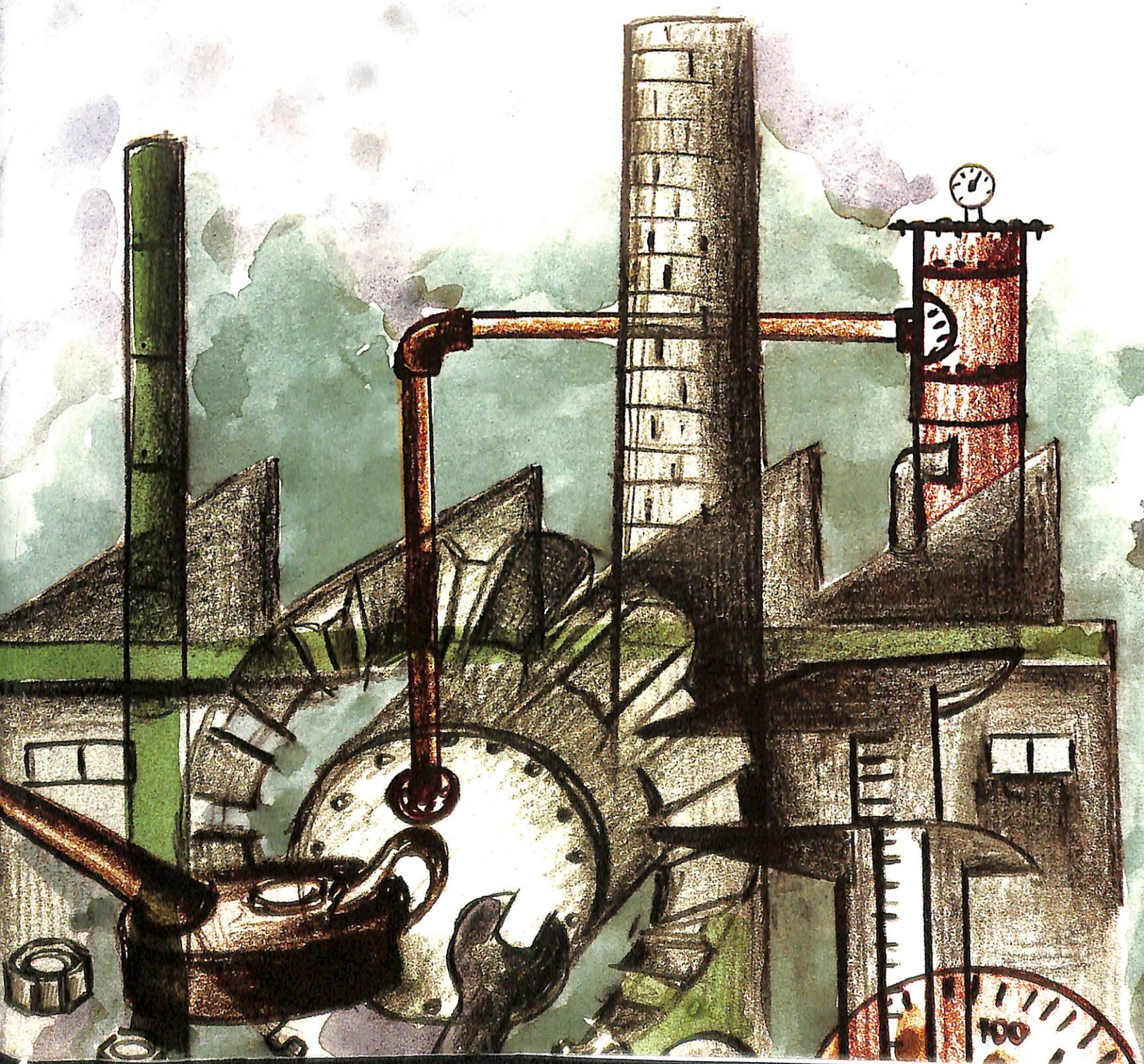
Manual de Mantenimiento

Ingeniería, Gestión y Organización

Alejandro J. Pistarelli



KOHA
620.0046
P679
2010
c. 14

KOHA

Manual de Mantenimiento

Pistarelli, Alejandro J.
Manual de mantenimiento : ingeniería, gestión y organización.
- 1a ed. - Buenos Aires : el autor, 2010.
696 p. : il. ; 27x19 cm.
ISBN 978-987-05-8420-9
1. Ingeniería. 2. Manuales. I. Título
CDD 620.711

Fecha de catalogación: 21/04/2010

© Alejandro J Pistarelli
Diseño: Sophie le Comte
Hecho el depósito que previene la ley 11.723
ISBN 978-987-05-8420-9
Todos los derechos reservados Esta publicación no puede ser reproducida, ni en todo, ni en parte, ni registrada en o transmitida por, un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia, o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito del Autor
Impreso en los talleres gráficos RyC
Araoz 512 – Banfield Buenos Aires. Argentina
Junio de 2013.
Esta edición consta de 1000 ejemplares

Manual de Mantenimiento

Ingeniería, Gestión y Organización

Alejandro J. Pistarelli

A mis hijos Luca, Julia y Bruno
¡por ser lo mejor de mi vida!

A mi madre, Yolanda Catalina,
por haber sido mi guía,
mi compañera y amiga.

A Verónica que colaboró
para concluir este trabajo.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
BIBLIOTECA CENTRAL
INVENTARIO: 142154

Agradecimientos

Destaco mi profundo agradecimiento a aquellos que con su trabajo y dedicación colaboraron con la creación y corrección de esta obra.

Al Ing. Esteban Lantos, por sus consejos y aporte profesional invalorable en Tribología y Análisis de Aceites. Al Ing. Osvaldo López, por su dedicación y esfuerzo para analizar y evaluar rigurosamente los contenidos. Al Ing. Julio Iuso, por su aporte innovador en temas relacionados con la problemática de gestión de inventarios. Al Ing. Nelson Caprioli, por su ayuda y aporte tecnológico en los contenidos referidos a los procesos de calibración de instrumentos. Al Ing. Alan Gerding, por su ayuda en la obtención de material técnico de consulta.

A mi amigo, el Ing. Eduardo Martín, por sus consejos y su aporte específico en el método Six-Sigma y otras herramientas de mejora. Al Ing. Antonio Lotorto, por su dedicación para leer y corregir algunos capítulos. Al Ing. Pablo David, por revisar rigurosamente los contenidos de mantenimiento detectivo. Al Ing. Adrian Tolosa, por leer y revisar varios capítulos y participar de las discusiones conceptuales.

Al profesional y especialista mantenedor Walter García, por su aporte en la búsqueda de material predictivo y sus comentarios referidos a la calibración de instrumentos. A José Luis Conti, dibujante y proyectista, por su trabajo en la confección de gráficos y dibujos. A María Paula Primavera, Ariel Marinig y Oscar Lapegüe, por sus ideas, comentarios y correcciones. Al Ing. Carlos Gregoret, por su aporte en la corrección y provisión de material técnico sobre el método predictivo de emisión acústica.

A los exalumnos, hoy ingenieros, de la Universidad Tecnológica Nacional (F.R.H.) Laura Toledo y Pedro Antonio Ferreirós, por su compromiso y esfuerzo desinteresado en leer y corregir la obra y por sus sugerencias y observaciones de gran valor.

A mi amigo, el artista plástico Carlos Torres, por los diseños de tapa y contratapa que le aportaron vida y color a este material.

A las siguientes empresas: Laboratorio Dr. Lantos, Lanxess S.A., MA Consultora.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
BIBLIOTECA CENTRAL
INVENTARIO:

Prólogo

Sería innecesario profundizar el estudio de la historia y evolución de las actividades industriales relacionadas con el mantenimiento. Simplemente porque es fácil entender que, junto al avance tecnológico, el mantenimiento evolucionó conceptualmente en los criterios y principios usados para abordar las fallas y, por sobre todas las cosas, sus consecuencias. De cualquier modo, cabe recordar que el hombre hace mantenimiento desde su aparición como especie.

Por otro lado, y aún siendo bastante lo escrito sobre mantenimiento de activos, es motivador pensar que será mucho también lo que se escriba en el futuro. La realidad del mantenimiento industrial es muy variada y todos los aportes que en su favor puedan hacerse serán siempre de utilidad para aquellos que, de una u otra manera, estamos vinculados profesionalmente a la especialidad.

La opinión pública tiene una tendencia de pensamiento particular acerca del Mantenimiento. Suele vinculárselo directamente con la seguridad cuando, habiendo sucedido un accidente o incidente, se dice, sin demasiado rigor de juicio, que hubo problemas o falta de mantenimiento. A su vez, resulta un sinsentido negar que muchas actividades de mantenimiento pueden tener, directa o indirectamente, un gran impacto en aspectos de seguridad y protección del medio ambiente.

El objetivo central del presente trabajo es transformarse en una herramienta de consulta sobre los problemas habituales con que se enfrenta el Ingeniero de Mantenimiento. La figura del Ingeniero de Mantenimiento inmediatamente obliga a pensar en las funciones de una especialidad en constante crecimiento: la Ingeniería de Mantenimiento. Hoy puede decirse, sin temor a exagerar, que Ingeniería de Mantenimiento se considera una especialidad dentro del ámbito de la ingeniería. Los profesionales dedicados a esta rama de la tecnología están siendo cada vez más reconocidos y deben ocupar su rol protagónico en la industria a través de la actualización y formación permanentes. El grado de formación que requiere un Ingeniero de Mantenimiento excede ampliamente las expectativas del pasado, cuando era necesario y suficiente con ser un buen reparador de máquinas. Hoy, un ingeniero de mantenimiento debe alcanzar la categoría de mantenedor. Los mantenedores se dedican a mantener las funciones de los equipos dentro de un marco de conveniencia para el proceso productivo (negocio) del que forman parte, deben comprender la importancia de los factores productivos sobre la política de gestión de activos y no mirar a su profesión como una actividad aislada del resto. El mantenedor moderno, incluso, debe considerar el compromiso que tienen las organizaciones con la sociedad para que los procesos (de bienes o servicios) sean sustentables.

Bajo estas circunstancias, poco espacio queda para dudar acerca de la necesidad de dotar de profesionalismo a las actividades de Mantenimiento. Afortunadamente hoy, el panorama de la gestión de activos está bastante más claro que hace un par de décadas y existen muchos más puntos de coincidencia entre los especialistas. Sin embargo, aún persiste cierta tendencia a defender paradigmas comprobadamente equivocados.

Anhelamos que este trabajo sea un punto de encuentro, y a la vez de partida, para que más personas se sumen al desafío de evolucionar hacia pensamientos más certeros en la lucha contra los fallos. Además, esperamos que su lectura sirva para resolver inquietudes cotidianas.

Alejandro J. Pistarelli

Índice de Contenidos

Capítulo 1
Mantenimiento y Disponibilidad

1.1 Introducción 15
Hipótesis del Contexto 16
Paradigma de Máxima Disponibilidad 17
Aspecto Económico 18
La Tecnología y el Mantenimiento 18
La Seguridad y el Mantenimiento 19
Definición 19

1.2 Disponibilidad 21
Fallas e Introducción a los Modos de Falla 21
Tipos de Fallas 24
Tipos de Modos de Falla 25
Tiempo Medio entre Fallas 27
Tiempo Medio para la Falla 28
Tiempo Medio para Reparación 29
Tasa de Fallas 29
Confiabilidad 30
Confiabilidad de Sistemas 40
Mantenibilidad 46
Disponibilidad Operacional 51

1.3 Patrones de falla 54

1.4 Tipos de mantenimiento. Introducción 59
Mantenimiento Correctivo 60
Mantenimiento Restaurativo 60
Mantenimiento Mejorativo 60
Mantenimiento Preventivo 61
Mantenimiento Predictivo 61
Mantenimiento Proactivo 61
Mantenimiento Detectivo 62
Mantenimiento Previsivo 62
Mantenimiento Imperativo ó Legal 62

Resumen de aplicación 64

Capítulo 2
Mantenimiento Preventivo

2.1 Mantenimiento Preventivo (Programado) 71
Reseña Histórica 71
Alcance y Definición 72

2.2 Reemplazos y Conservaciones Programadas 74
Hipótesis y condiciones de aplicación 75
Frecuencia de las Tareas Preventivas 78
Combinación de Tareas
(para distintos modos de falla) 91

2.3 Mantenimiento de Rutina -
Chequeos de Recorrida 93
Rutinas de Inspección 93
Frecuencia de las Rutinas de Inspección 95
Inspecciones de Área 97
Puesta en marcha de las
Rutinas de Inspección 97

2.4 Rutas de Lubricación 99
Frecuencia para las Rutas de Lubricación 101

2.5 Calibración 103
Definiciones útiles 104
Determinación de la incertidumbre 104
Criterio de aceptación para variables
de proceso 106
Combinación de sustitución o
restauración cíclica y calibración 108
Frecuencia de Calibración 109
Condiciones de almacenaje y
mantenimiento 110

Resumen de Aplicación 112

Capítulo 3
Mantenimiento Predictivo y Proactivo

3.1 Mantenimiento Condicional
(Predictivo / Proactivo) 121
Alcance y Definición 122
Hipótesis y Condiciones de aplicación 123
Ventajas del Mantenimiento Predictivo 126
Mantenimiento Proactivo 127
Frecuencia de las Tareas Condicionales 129
Rutas de Mantenimiento Condicional 140

Resumen de aplicación 142

Anexos Relacionados
Anexo I: Estimación del intervalo $\Delta t_{SFprimario}$ 672

Capítulo 4
Técnicas de Mantenimiento Condicional

4.1 Técnicas de Mantenimiento Condicional 149

4.2 Análisis de Vibraciones en
tiempo y frecuencia 150
Fundamentos 150
Diagramas de Espectro
(Dominio de las frecuencias) 154
Instrumentos de Medición 157
Geometría de las Mediciones 159
Diagnóstico 160
Valores de Operación y Diagnóstico
(Nominal, Alerta y Alarma) 179
Consideraciones y
Recomendaciones Finales 180

4.3 Termografía Infrarroja 182
Alcance y objetivos de la
Termografía Infrarroja 182
Transmisión del Calor 182
Espectro Electromagnético 183
Radiación Térmica 185
Cámaras para Termografía
(principio de funcionamiento) 190
Ventajas y Desventajas de la
Termografía Infrarroja 192

Aplicaciones y Diagnóstico 192
Recomendaciones para programar una Ruta de Termografía 201

4.4 Tribología y Análisis de Aceites 202
Alcance de los Análisis de Aceite 203
Objetivos y Fallas Sintomáticas 203
Introducción a la Lubricación 205
Formulación y clases de Lubricantes 207
Aditivos 209
Análisis Tribológico (Base + Aditivo + Máquina + Medio) 211
Parámetros Específicos de Diagnóstico 223
Ensayos sensoriales de campo 237
Precauciones durante el muestreo 239
Grasas Lubricantes 240
Manejo y almacenamiento de Lubricantes 244

4.5 Otras Técnicas Condicionales 245
Los Sentidos Humanos 245
Estetoscopía Industrial 246
Emisión Acústica 246
Prueba Hidráulica y Neumática 250
Ultrasonido (por excitación Natural) 250
Ultrasonido (por excitación de Eco Ondas) 252
Tintas Penetrantes 253
Partículas Magnéticas 254
Radiografía Industrial 254
Extensometría (Strain Gauges) 256
Boroscopía Industrial 256
Análisis de Motores Eléctricos 257
Ensayo de Impedancia en Baterías 260
Análisis de Gases de Combustión 261
Alteración en los parámetros de Calidad del Producto 263

Resumen de Aplicación 264

Anexos Relacionados
Anexo II: Valor Eficaz ó RMS 673
Anexo III: Estándares y Especificaciones útiles para Vibraciones Mecánicas 674
Anexo IV: Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas 677
Anexo V: Clasificación AGMA para lubricantes de transmisión 680

Capítulo 5
Mantenimiento Detectivo y Riesgo Industrial
5.1 Mantenimiento Detectivo 283
Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección 283
Definición de Mantenimiento Detectivo 287
Fallos Ocultos 287
Fallas Simultáneas 288
Aplicación del Mantenimiento Detectivo 290
Reducción de la probabilidad de Falla Simultánea por diseño 290
Cómo identificar Fallos Ocultos 291

5.2 Manejo del Riesgo Industrial 292
Riesgo y nivel de aceptación 292
Riesgo Laboral 294
Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo - EPR 295
Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo 297

5.3 Frecuencia para las Rutinas Detectivas 313
Disponibilidad Intrínseca 314
Estimación del intervalo entre Inspecciónes 315
Cuando el Fallo Simultáneo únicamente tiene impacto económico 327
Optimización de la frecuencia de inspección 333

Resumen de Aplicación 334

Capítulo 6
Acciones Reactivas de Mantenimiento
6.1 Introducción 343
Evolución histórica 343
Conveniencia técnico-económica 344

6.2 Mantenimiento Correctivo (Acción Reactiva No Programada) 345
Gestión del Mantenimiento Correctivo 345
Planificación del Mantenimiento Correctivo 346
Criterios de Prioridad 348
Ventajas y Desventajas del Mantenimiento Correctivo 350

6.3 Mantenimiento Restaurativo (Acción Reactiva Programada) 351

6.4 Mantenimiento Mejorativo (Acción Reactiva Programada) 352
Objetivos 352
Una particularidad, el Mantenimiento Curativo 353

Resumen de Aplicación 354

Capítulo 7
Procesos y Metodologías para mejorar el Mantenimiento
7.1 Introducción 361
Nuevos Criterios 361
Documentación Técnica 362
Prueba y Error 362
Aplicar correctamente la tecnología correcta 363

7.2 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) 364
Reseña Histórica 364
Beneficios y Alcance de un Análisis RCM 365
Metodología de Trabajo 366

Pasos de un Análisis RCM 369
Reuniones de Trabajo 386
Ventajas y Desventajas del RCM 387

7.3 Técnicas de ayuda para el Análisis de Fallas 389
Principio de Pareto 389
Tormenta de Ideas (Brainstorming) 392
Técnica del Por qué - Por qué 392
Diagrama Causa - Efecto (Diagrama de Ishikawa) 394
Técnica de las 5W + 1H y el Análisis de Fallas (ADF's) 395
Análisis P-M (Physical Mechanism) 398
Análisis Causa - Raiz de Falla (RCA) 401
Árbol de Fallos 405
Árbol de Eventos 405

7.4 Mantenimiento Productivo Total (TPM) 406
Objetivos del TPM 406
Beneficios esperados de su aplicación 408
Proceso de Implementación 408
Pilares TPM 409
Relación entre Pilares 439
Consolidación del TPM 439
Pérdidas y Productividad Total de Equipo 439
Ventajas y Desventajas del TPM 444
Aplicación simultánea e integrada de TPM y RCM 446

7.5 Herramientas de Mejora 448
Metodología Six Sigma 448
El Benchmarking 450

Resumen de aplicación 454

Anexos Relacionados
Anexo VI: Guía Práctica para estimar Criticidades 681
Anexo VII: Planilla tipo para Análisis de Fallas (ADF's) 684
Anexo VIII: Ejemplo de OPL (One Point Lesson) 685
Anexo IX: Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Costo) 686
Anexo X: Análisis de Tiempos Productivos 687
Anexo XI: Estratégia de las 5S (Housekeeping) 692

Capítulo 8
Administracion y Programación del Mantenimiento
8.1 Introducción 471

8.2 Registros de Mantenimiento 472
Maestro de Equipos 472
Codificación del Maestro de Equipos 474
Tipos de Registros 475
Gestión de la Información y Manejo del Cambio 476

8.3 Sistemas Informáticos de Mantenimiento (SIM) 477
Módulos 477
Tablas para Modos de Falla 478
Programación 479
Avisos de Trabajo 479
Órdenes de Trabajo 479
Historial 483
Reportes de Mantenimiento 484
Proceso de un SIM 484
Relación del SIM con otras soluciones informáticas 485
Selección e Implementación del SIM 485
Ventajas y Desventajas de los SIM 487

8.4 Programación Integral y Preparación del Mantenimiento 489
Procedimientos de Mantenimiento (Documentos) 491
Mantenimiento Preventivo - Programación y Planificación 494
Mantenimiento Condicional - Programación y Planificación 495
Mantenimiento Detectivo - Programación y Planificación 499
Programa Maestro de Mantenimiento 501
Optimización de un Programa Maestro de Mantenimiento 504
Conclusiones 506

8.5 Grandes Reparaciones 508
Características que distinguen una Parada de Planta 509
Fases de una Parada de Planta 509
Seguridad en una Parada de Planta 515
Calidad en una Parada de Planta 515
Infraestructura y Mantenimiento Edilicio 516

8.6 Seguridad y Mantenimiento 518
Principio de Heinrich 518
Situaciones Inherentemente Riesgosas 519
Gestión de la Seguridad 520
Procedimientos de Seguridad en Mantenimiento 522

Resumen de Aplicación 524

Anexos Relacionados
Anexo VI: Guía Práctica para estimar Criticidades 681
Anexo XII: Códigos de Equipos 693

Capítulo 9
Gestión de Repuestos
9.1 Introducción 539
Objetivos del Almacén de Repuestos 539
Clasificación del Inventario 539

9.2 Sistemas de Gestión de Stocks (SGS) 543
Módulos de un SGS 543
Parámetros de Control de Stock 544

9.3 Nivel Óptimo de Existencias 545
Modelo Determinista o del Punto de Pedido 545
Modelo Probabilístico 553
Modelo de Aprovisionamiento JIT (Just in Time) 559

9.4 Gestión del Almacén de Repuestos 561
Relación del Almacén con otras áreas 561
Criterios de almacenamiento 562
Auditorias de Inventario 563
Estandarización y Obsolescencia 564
Indicadores de Gestión de Inventario 565

Resumen de Aplicación 566

Capítulo 10
Organización del Mantenimiento
10.1 Introducción 575

10.2 Factores Estructurales 576
Dotación 577
Competencias 578
Motivación 579
Desempeño 579
Estructura Orgánica 579

10.3 Funciones y Responsabilidades 585
Posiciones de Mantenimiento 585
Comentarios sobre el Liderazgo 588
Comentarios sobre el Span of Control 589

10.4 Crecimiento de Talentos 591
Capacitación 591
Desarrollo 592
Evaluación 592

10.5 Tercerización del Mantenimiento 593
Razones de la Tercerización 593
Contratos para Servicios de Mantenimiento 594
Criterios de éxito para la Tercerización de Servicios 596
Causas de incumplimiento de contratos 597

Resumen de Aplicación 598

Capítulo 11
Costos de Mantenimiento
11.1 Introducción 607

11.2 Tipos de Gastos (Visión Tradicional) 609
Gastos de Mano de Obra 609
Gastos de Materiales 609
Gastos de Terceros 610
Gastos Financieros 610
Gastos por Fallos 610
Gastos Fijos 611
Gastos Variables 611

11.3 Gasto Integral de Mantenimiento 612
Visión de la Contabilidad del Valor 613

11.4 Ciclo de Vida de los Activos 615
Renovación de activos y estrategias de Mantenimiento 616

11.5 Presupuesto de Mantenimiento 618
Criterios de Presupuestación 619
Control Presupuestario 620

11.6 Indicadores de Gestión de Costos de Mantenimiento 621

Resumen de Aplicación 622

Anexos Relacionados
Anexo IX: Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC – Life Cycle Cost) 686

Capítulo 12
Medición y Control del Mantenimiento
12.1 Introducción 629
Implementación de Indicadores 630
Propiedades que deben satisfacer los Indicadores 631

12.2 Agrupación y Clasificación 632

12.3 Desarrollo de Indicadores 634
Gestión Operativa 634
Gestión de Órdenes de Trabajo 634
Mantenimiento 636
Gestión de Repuestos (Inventario) 640
Gestión de Mejoras 640
Personal 640
Seguridad y Medio Ambiente 644
Gestión de Gastos / Costos 644

12.4 Tableros de Control de Mantenimiento 649
Reporte Gerencial 654
Reporte Corporativo (o de Divulgación) 654
Reporte de Ingeniería de Mantenimiento 654
Reporte Operativo 654

12.5 Mejorar a partir de la medición diaria 655

12.6 Diagnósticos de Mantenimiento 656

Resumen de aplicación 662

Capítulo 1

Mantenimiento y Disponibilidad

El único medio que tenemos de interpretar la naturaleza son las ideas audaces, las anticipaciones injustificadas y el pensamiento especulativo.... los que no están dispuestos a exponer sus ideas a la aventura de la refutación no toman parte en el juego de la ciencia[1].

---

1 Karl Popper "La Lógica de la Investigación Científica". Madrid 1973, Tecnos.

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Describir la meta del mantenimiento industrial y entender el proceso a desarrollar para obtener los máximos beneficios.
- √ Comprender el impacto que tiene el contexto operativo en los planes de mantenimiento.
- √ Entender el significado de falla y causa raíz de falla (modo de fallo).
- √ Conocer los tipos de distribución de fallas más comunes y su relación con la Confiabilidad, la Mantenibilidad y la Disponibilidad.
- √ Seleccionar y utilizar indicadores de rendimiento para la gestión de activos fijos.
- √ Establecer el método más apropiado para calcular la confiabilidad de sistemas.
- √ Calcular la disponibilidad de sistemas productivos.
- √ Identificar y comprender los patrones de falla de acuerdo al comportamiento de un elemento y cómo se relacionan éstos con los tipos de mantenimiento conocidos.
- √ Familiarizarse con las acciones de mantenimiento del tipo Reactivo y Pro-activo, y entender los criterios básicos bajo los cuales se aplica cada una.

Índice de Contenidos

1.1 Introducción
- Hipótesis del Contexto
- Paradigma de Máxima Disponibilidad
- Aspecto Económico
- La Tecnología y el Mantenimiento
- La Seguridad y el Mantenimiento
- Definición

1.2 Disponibilidad
- Fallas e Introducción a los Modos de Falla
- Tipos de Fallas
- Tipos de Modos de Falla
- Tiempo Medio entre Fallas
- Tiempo Medio para la Falla
- Tiempo Medio para Reparación
- Tasa de fallas
- Confiabilidad
- Confiabilidad de Sistemas
- Mantenibilidad
- Disponibilidad Operacional

1.3 Patrones de falla

1.4 Tipos de mantenimiento. Introducción
- Mantenimiento Correctivo
- Mantenimiento Restaurativo
- Mantenimiento Mejorativo
- Mantenimiento Preventivo
- Mantenimiento Predictivo
- Mantenimiento Proactivo
- Mantenimiento Detectivo
- Mantenimiento Previsivo
- Mantenimiento Imperativo ó Legal

Resumen de aplicación

1.1 Introducción

El Mantenimiento es un proceso de gestión integral que debe comenzar en el momento mismo de la concepción de una obra o anteproyecto; vale decir, desde el inicio del ciclo de vida de los equipos. Lamentablemente es fácil darse cuenta que esto no siempre se ve reflejado en la práctica. Nos conformamos con pensar en el mantenimiento a partir del momento en que los equipos o activos se instalan en la Planta, o aún lo que es peor, cuando comienzan a funcionar.

La Gestión del Mantenimiento, como especialidad de la ingeniería, abarca un amplio campo de aplicación. Hay mantenimiento en la industria química y petroquímica, industria del acero, construcción, aeronáutica, hospitales, escuelas, bancos, ingenios, centros de compras, minas, distribución eléctrica, servicios públicos, redes informáticas, etc.

Todas las decisiones tomadas en relación a un activo como parte de un sistema productivo de bienes o servicios, y en cualquier etapa de su vida, tendrán indefectiblemente algún impacto en su desempeño. Además, las máquinas durante su operación sufren un proceso de deterioro, por lo que es preciso eliminar o reducir las pérdidas operativas de cualquier índole que ocurran a raíz de tal proceso.

El principal objetivo de esta sección es hallar una definición para el proceso Mantenimiento que se ajuste a las necesidades actuales, teniendo en cuenta algunos aspectos de importancia.

En principio debe reconocerse que el mantenimiento busca que las instalaciones satisfagan las funciones requeridas por el proceso productivo. Por tanto, las actividades relacionadas con mantener funciones de activos deben ser dosificadas con estudiada precisión. Téngase en cuenta que, en mayor o menor medida, las intervenciones de mantenimiento son invasivas por naturaleza y su aplicación es conveniente que sea controlada y no deliberada; no siempre por *"hacer más"* se obtienen mejores resultados.

Suele definirse a Mantenimiento como un conjunto de acciones de preservación de activos, en un determinado sector productivo, satisfaciendo estándares de calidad, seguridad o servicio. También se lo relaciona con el impacto que tiene en la salud económica del negocio a través de los gastos en los que hay que incurrir para realizar las tareas. Sin embargo, y al igual de lo que sucede con la empresa en su totalidad, las estrategias y actividades para mantener las funciones de los equipos deben estar alineadas con la misión y objetivos de la organización; la gestión del mantenimiento debe desarrollarse, desde todo punto de vista, lo más cercanamente posible a la producción.

En los últimos tiempos la misión y objetivos del Mantenimiento han virado desde un punto de vista conceptual. El abandono de viejos paradigmas se vio forzado por la necesidad de cubrir las expectativas actuales de producción. La misión de toda actividad industrial, es su razón de ser; más precisamente, las razones por las que existe. La misión debe ser amplia y estar claramente establecida y conocida por todos los miembros de la empresa.

Eliyahu M. Goldratt en su libro **La Meta**[1] introduce nuevas ideas referidas a los objetivos primarios que una actividad industrial alcanza y mantiene. El autor indica que la meta de una organización que produce bienes o servicios es ganar dinero ahora y en el futuro. Por lo tanto, todo lo que se haga en el *Proceso Mantenimiento*, desde un punto de vista económico, deberá apuntar a que la compañía alcance su meta.

Mantenimiento presta un servicio basado en la reparación de averías o defectos. Pero no sólo ello, también persigue anticiparse a las fallas aplicando métodos de análisis para evitar su recurrencia o mitigar sus consecuencias. Además, y ocasionalmente, el área de Mantenimiento puede participar en la modificación de activos para aumentar su disponibilidad o capacidad. Si bien es cierto que desde lo estrictamente conceptual dichas modificaciones no representan acciones de mantenimiento, de todos modos deben tenerse en cuenta.

Considérese que los programas de mantenimiento no tienen efecto sobre los aumentos de capacidad nominal productiva. Las áreas operativas deben asumir que no es posible superar las expectativas del diseño sólo ejecutando acciones de mantenimiento puro. Para incrementar la capacidad nominal de un diseño, hacen falta recursos adicionales, tecnología y un proceso estable de mejora.

El concepto anterior permite definir ítem *mantenible* como aquel cuya capacidad inherente en su diseño supera la capacidad deseada; sólo en estos casos Mantenimiento puede asumir el compromiso de garantizar su disponibilidad.

---

1 Eliyahu M. Goldratt es autor de La Meta (Ed. Díaz de Santos 1993), y de otras publicaciones como "No es cuestión de Suerte".

Gestionar el Mantenimiento también requiere administrar recursos, por lo general escasos. Es un proceso de análisis y reflexión pues muchos de estos recursos, como las variables que intervienen, están en función del tipo de industria y del escenario en el que ésta se desempeña. El nivel de disponibilidad necesario, la calidad requerida para los productos, los niveles de servicios solicitados, los volúmenes de producción comprometidos, las habilidades del personal y su especialización, el escenario financiero que atraviesa la empresa, las reglamentaciones vigentes en seguridad y medio ambiente, etc., son factores propios de un determinado contexto. Cuando una compañía decide *hacer mantenimiento*, debe primero definir el alcance de lo que desea mantener en su contexto. ¿Qué pretendemos de los equipos?

Lo tradicional fue siempre pensar en el mantenimiento del activo como una actividad aislada del resto del sistema, con parámetros que tienen categoría de **absolutos**. En mantenimiento, como en otras actividades, la mayoría de los parámetros son **relativos**. Analizar un sistema asumiendo sus parámetros como relativos es entenderlo de manera **sistémica**; es en este punto donde radica el problema y ocurren las mayores divergencias de criterio.

Si las instalaciones se conciben aisladas del contexto de funcionamiento del que forman parte, las acciones tomadas no tendrán la profundidad necesaria para satisfacer los resultados esperados. Muchas acciones irán dirigidas a objetivos intrascendentes y se generarán gastos innecesarios. Por otra parte, se correrá el riesgo de omitir tareas imprescindibles para evitar o minimizar perjuicios en la seguridad o el entorno.

Por el contrario, si se considera a los activos dentro del sistema productivo y formando parte de un proceso integrado, donde no haya propiedades absolutas sino relativas, podremos darle al proceso de gestión de mantenimiento mayor alcance, eficacia y eficiencia.

Asumir que los equipos pertenecen a un proceso sistémico pondera la ***hipótesis del contexto*** *y permite conocer sus funciones en profundidad para mantenerlas en estado operativo.*

1.1.1 Hipótesis del Contexto

El conjunto de factores de cualquier índole que influyen de manera directa o indirecta sobre el funcionamiento de un equipo en proceso, se llama **Contexto de Funcionamiento** o **Contexto Operativo**. Se resumen a continuación algunos de estos factores.

- √ *Ubicación, distribución y tipo de proceso productivo.*
- √ *Materias primas e insumos utilizados.*
- √ *Consecuencias de las detenciones.*
- √ *Factores sociales, geográficos y climáticos.*
- √ *Regímenes y estándares de operación.*
- √ *Dispositivos de protección y grado de redundancias (elementos en stand-by).*
- √ *Períodos de servicio, tipo de demanda.*
- √ *Cantidad y grado de habilidad de los talentos humanos.*
- √ *Sistema de gestión implementado y su profundidad de despliegue.*
- √ *Capacidad, calidad y precio de los proveedores.*
- √ *Disposiciones legales sobre Seguridad y Medio Ambiente.*

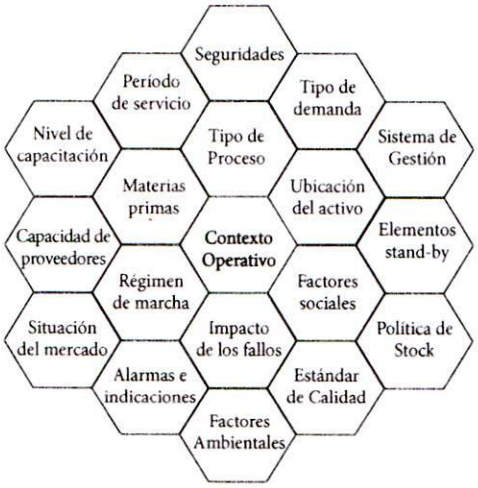


Figura 1.1.1 Factores que influyen y determinan el Contexto Operativo de un equipo.

La importancia del contexto operativo en la gestión de activos es fuertemente señalada por la metodología RCM[1]. Siendo que el entorno en el que actúa un equipo tiene un gran impacto en su estrategia de mantenimiento, se torna imprescindible mencionarlo en este momento porque excede ampliamente el ámbito de la metodología mencionada. El contexto operativo debe considerarse en cualquier método de gestión o emprendimiento de mantenimiento.

Si el contexto operativo varía, es altamente probable que también lo hagan las funciones que los equipos cumplen dentro de él. Si el entorno cambia, seguramente será a través de los factores enumerados en la figura anterior. Dichas alteraciones influyen directamente en las funciones del activo y, por tanto, en su estrategia de mantenimiento. Así por ejemplo, dos ventiladores de impulsión de aire iguales podrán tener distintos planes de mantenimiento si el contexto operativo en el que operan no es el mismo.

El concepto de contexto operativo constituye la mejor explicación acerca de que los planes de mantenimiento son dinámicos. Que sean dinámicos no significa que tengan que cambiar porque sí, o que su modificación deba ser establecida con anticipación a la entrada en servicio. En realidad se encuentran en una situación potencial de cambio permanente; vale decir, son susceptibles de modificación. Por tal motivo, es imprescindible contar con procesos de mejora bien establecidos y eficaces.

La hipótesis del contexto establece que cualquier activo fijo se comportará de acuerdo al entorno en el que se desarrolla. Las necesidades que de él se tengan (sus funciones) estarán signadas en gran medida por ese contexto.

Siendo que el entorno influye en las funciones de los equipos, Mantenimiento debe asegurar que dichas funciones se cumplan en el contexto reinante; y no en un contexto o situación ideal. Es por tal motivo que Mantenimiento no debe mantener equipos concebidos como **objetos absolutos**, sino que debe mantener sus funciones como **objetos relativos** al propio contexto.

Un equipo se pone en servicio para dar garantía de continuidad a funciones específicas; alguien lo instaló para cumplir un propósito y un objetivo. Mantenimiento debe preservar justamente la condición básica de funcionamiento a través de sus funciones. Sin embargo, la noción de condición básica (utilizada por el TPM[2]) tampoco es un parámetro absoluto. Puede no ser necesario que todos los equipos de un proceso productivo alcancen cierto grado de condición básica **absoluto** pues podría generarse un elevado e innecesario nivel de gastos.

Los responsables de las áreas de mantenimiento deben nutrirse de nuevas metodologías de optimización y gestión que tengan en cuenta estos aspectos y que aporten favorablemente en el cumplimiento de objetivos integrales como, por ejemplo, el RCM y el TPM.

1.1.2 Paradigma de Máxima Disponibilidad

Es comprensible que para encontrar una buena definición para Mantenimiento, y teniendo en cuenta que se trata de una actividad técnica - económica, podamos comenzar analizando las funciones de los elementos desenvolviéndose en un determinado contexto operativo. Como se mencionó oportunamente, no alcanza con mantener equipos. Ir más allá significa pensar que, desde un punto de vista productivo, debemos mantener funciones.

Reparemos en el hecho de que mantener equipos realza la noción de absolutismo; mientras que la manutención de sus funciones tiene un carácter relativista.

Escuchamos a menudo: *"Mantenimiento debe garantizar la disponibilidad"*, y sobre esto existe poca discusión. Pero.... ¿La disponibilidad de qué? ¿De los equipos? No precisamente. Debe procurar mantener la disponibilidad de las funciones. Y, ¿qué nivel de disponibilidad?, ¿importa la máxima disponibilidad?, no necesariamente, sino la disponibilidad suficiente para que el proceso productivo no se vea interrumpido o afectado de ninguna forma.

Un sistema productivo se verá comprometido cuando deje de aportar lo necesario para cumplir con la meta y objetivos de la empresa, y en ningún otro caso.

---

1 RCMII - Reliability Centred Maintenance (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) de John M. Moubray - Aladon LLC2004, página 29.
2 Herramienta administrativa de Gestión y Mejora cuyas siglas en inglés significan Mantenimiento Productivo Total.

En ciertas ocasiones, para mejorar la disponibilidad es preciso hacer modificaciones totales o parciales sobre un equipo. En lo que respecta al mantenimiento, estas mejoras pueden requerirse por razones de **confiabilidad** o de **mantenibilidad**. Sin embargo, toda alteración deberá aportar con valor a la meta directa o indirectamente. *(Ver Mantenimiento Mejorativo, Capítulo 6).*

1.1.3 Aspecto Económico

El área de mantenimiento presta un servicio al resto de las actividades productivas. Las tareas técnicas y administrativas de tal servicio generan gastos operativos que deben ser controlados. Sin embargo, el control de gastos en mantenimiento no debe basarse únicamente en los costos que sólo indican resultados de corto plazo.

Se dice que lo que no se puede medir no se puede controlar ni mejorar. Los indicadores de resultados y de proceso son adecuados para medir e implementar acciones que corrijan los desvíos. No obstante, resulta difícil mejorar el desempeño de un activo si la medición efectuada es errónea. Medir mal es tener indicadores inadecuados; consecuentemente, los resultados que éstos arrojen pueden inducirnos a decisiones cuyas consecuencias sean catastróficas.

Es muy común escuchar comentarios como: *"Si todos nuestros indicadores están bien.....no sabemos por qué estamos como estamos".*

Cuantificar el gasto de mantenimiento y las pérdidas asociadas a los fallos es relativamente sencillo; estimar los ahorros por un buen desempeño en la gestión, no es costumbre y resulta bastante más difícil. En el capítulo correspondiente a gastos de mantenimiento se aborda la problemática de indicadores de resultados vinculados al gasto integral. Por el momento, es suficiente saber que los indicadores son sólo herramientas útiles para medir la eficacia, eficiencia o efectividad de un proceso y tomar decisiones en consecuencia. Si éstos no son adecuados, probablemente las decisiones tampoco lo sean. *"...se debe dedicar tanto esfuerzo en asegurar que se están realizando las tareas correctamente como en asegurar que se están haciendo las tareas correctas."*[1]

Para hacer mantenimiento es necesario gastar recursos; pero ¿cuál es el monto más bajo que garantiza alcanzar la meta? "Debemos hacer mantenimiento al menor costo posible", motivante afirmación que esconde un falso paradigma porque puede suceder que tomar el gasto aislado de alguna otra variable industrial resulte contraproducente, sobre todo a largo plazo. Una cosa es reducir el **costo instantáneo** y otra el **costo total integral.**

La respuesta pareció darla la contabilidad de costos; por ejemplo, haciendo el cociente entre el gasto de mantenimiento y el volumen producido. Este indicador parece ser irrefutable porque permite hacer comparaciones entre los costos de mantenimiento de dos activos similares. Sin embargo, puede ocurrir que el menor costo no contribuya a los objetivos del negocio. No siempre el menor costo (así estimado) es garantía del aumento de beneficios por ventas. Las compañías buscan aumentar sus ingresos netos por ventas y no bajar los costos. Estos dos últimos aspectos no siempre van de la mano.

El costo de mantenimiento, como indicador, es tremendamente peligroso si no se utiliza en forma correcta y oportuna. La capacidad instalada y el sostenimiento de la disponibilidad en el tiempo, pueden verse seriamente afectados si dicho indicador es mal interpretado.

1.1.4 La Tecnología y el Mantenimiento

Es frecuente ver que conforme aumenta el nivel de complejidad técnica aumenta también el grado de habilidad y preparación requerido de los talentos humanos cuya responsabilidad será intervenir tanto en el diagnóstico como en la reparación de los fallos.

▹ El aumento de capacidad nominal requiere mayor atención

Siendo que generalmente los procesos productivos incrementan en forma progresiva su capacidad nominal, y no aumentan proporcionalmente en número, las detenciones provocadas por las averías tendrán cada vez mayor impacto.

▹ El aumento de complejidad técnica requiere mayor atención

Las formas, causas o maneras de fallar de los componentes son cada vez más complejas y menos domi-

---

1 Del libro RCMII Reliability Centred Maintenance de John M. Moubray - Aladon LLC2004, página 6.

nantes *(Ver modos de falla)*. Las fallas suelen ser más fortuitas o aleatorias. Antiguamente las formas en que un equipo podía fallar estaban asociadas a un par de causas fáciles de identificar y vinculadas casi exclusivamente al desgaste progresivo. A medida que crece la automatización y la complejidad, estas posibles *formas de fallar* aumentan en complejidad y cantidad. Su diagnóstico se vuelve más y más dificultoso y la probabilidad de que surjan defectos inesperados se eleva significativamente.

▹ **El contexto operativo requiere mayor atención**
Los regímenes de trabajo actuales a los que se encuentran sometidos los equipos son bastante más exigentes que en el pasado. Mayores velocidades de trabajo, elevadas temperaturas, mayor carga puntual, mayores estándares de calidad, etc. son algunas de las causas que obligan a la función mantenimiento a evitar la aparición de averías que alejen a las funciones del activo (total o parcialmente) de su estándar de funcionamiento.

De acuerdo a estos tres aspectos anteriores se impone la necesidad de controlar y evitar cada vez con mayor énfasis las detenciones no previstas, porque aumenta considerablemente la sensibilidad del proceso productivo. Con el aumento de la capacidad nominal de un equipo se compromete mayor volumen y las consecuencias que tendrán ahora las detenciones serán también mayores. Los efectos contra los que hay que lidiar tienen cada vez mayor impacto desfavorable, y el mantenimiento debe enfocarse y esforzarse en minimizar la ocurrencia de las fallas y mitigar sus consecuencias.

Para afrontar este incremento de dificultad, el personal afectado a Mantenimiento debe estar permanentemente actualizado y contar con recursos suficientes.

1.1.5 La Seguridad y el Mantenimiento

La seguridad y el mantenimiento están íntimamente relacionados. Este concepto esta a flor de piel en la opinión pública. Cuando acontecen hechos desgraciados en que personas o entorno han sufrido daños, el mantenimiento es uno de los factores primeramente analizados.

En ciertos ámbitos tecnológicos las funciones de los equipos tienen como misión prevenir situaciones peligrosas. Si el servicio que presta Mantenimiento no es capaz de proteger las funciones en un grado tal que las fallas con perjuicios graves no se manifiesten, evidentemente estamos frente a falta de calidad en los trabajos, incumplimiento del plan de mantenimiento o rutinas de mantenimiento mal diseñadas (plan de mantenimiento inadecuado).

Por lo anterior, y en mucha mayor escala de lo que habitualmente se cree, Mantenimiento debe asumir su rol protagónico. Muchas acciones llevadas adelante casi diariamente en el ámbito industrial (o de servicios), encierran potenciales consecuencias para la seguridad.

Los dispositivos de seguridad, alarmas, circuitos automáticos de detención, elementos de protección, equipos redundantes (stand-by), sistemas contra incendios, detectores, etc., son todos componentes que el mantenimiento debe gestionar de manera eficaz.

Existen distintas estrategias de mantenimiento[1] para reducir a niveles tolerables los riesgos de falla que pongan en peligro la seguridad. Lo interesante es determinar qué clase de mantenimiento o combinación de tareas será mejor en cada caso.

1.1.6 Definición

Con lo precedente podemos definir al Mantenimiento como:

Proceso que tiene como misión lograr los niveles establecidos de disponibilidad para las funciones de la instalación en su contexto operativo, valiéndose de talentos humanos, recursos, activos, controles y mecanismos de gestión, y satisfaciendo los niveles de Producción / Servicio comprometidos por la Organización durante un determinado horizonte de tiempo con los estándares de seguridad vigentes y sin incurrir en gastos que no contribuyan con el sostenimiento de las condiciones anteriores.

---

1 Se llama Estrategia de Mantenimiento al conjunto de tareas de mantenimiento que se aplican a un equipo con el fin de evitar la ocurrencia de las fallas o minimizar sus consecuencias, y sin agregarle valor adicional a éste.

El **Proceso Mantenimiento** puede representarse por medio del siguiente esquema:

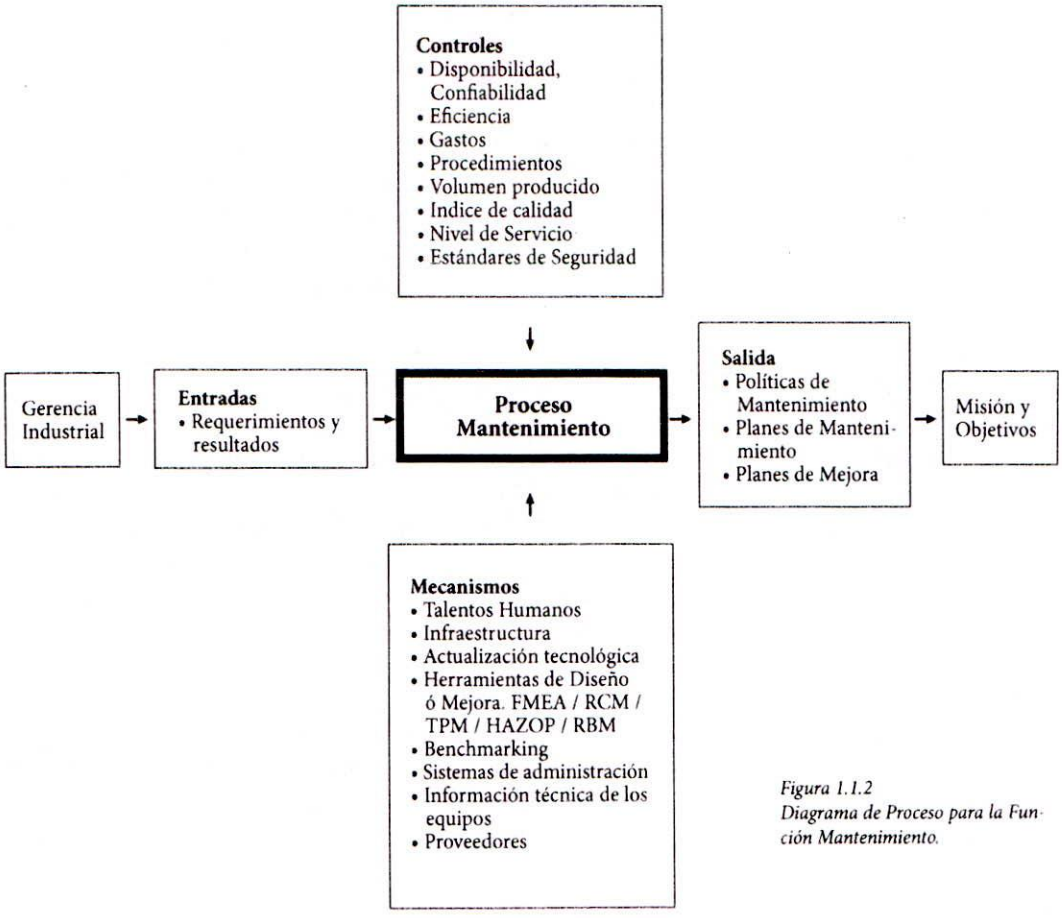


Figura 1.1.2
Diagrama de Proceso para la Función Mantenimiento.

Cabe finalmente mencionar que un error sorprendentemente generalizado es *diseñar para la media.* Creer que pueden aplicarse estrategias de mantenimiento idénticas para todos los equipos pertenecientes a un mismo *tipo.* Esto es un error por lo dicho anteriormente en relación al contexto operativo y a las funciones que los equipos desarrollan dentro de él.

1.2 Disponibilidad

La combinación apropiada de Mantenibilidad y Confiabilidad es garantía del sostenimiento de la Disponibilidad.

Figura 1.2.1 Esquema de Disponibilidad.

Con Mantenimiento se busca sostener los valores de disponibilidad según las necesidades del proceso. Esta propiedad debe ser conservada en el tiempo dentro de límites prefijados.

La **Disponibilidad Operacional**, conocida como *Available Production Time*, se mantiene con dos pilares fundamentales, la Confiabilidad y la Mantenibilidad. El mantenimiento tiene que ser capaz de asegurar la firmeza de estas *columnas*. La altura del *techo* está en relación a los valores necesarios y suficientes para no interrumpir los procesos productivos. Hablamos de disponibilidad requerida y no de máxima disponibilidad.

Cuando se aborden temas referidos a los tipos de mantenimiento, se verá que alcanzar un valor de disponibilidad explícito requerirá cierto tipo de tareas (y frecuencias). Si dicho valor (expectativa) cambia, probablemente también varíen las tareas y sus frecuencias de ejecución.

El estudio y diseño del Plan de Mantenimiento tiene como variable fundamental el nivel de disponibilidad requerido, por ello no es justo hablar de *máxima disponibilidad*, en términos absolutos.

1.2.1 Fallas e Introducción a los Modos de Falla

La entidad suprema en el ámbito del mantenimiento es el **modo de falla (fallo**[1]**)**. Existe abundante material escrito al respecto; sin embargo, en general se percibe falta de uniformidad de criterios. Solemos escuchar: *"la máquina falló"*, *"el sistema se encuentra en estado de falla"*, *"hay que eliminar los fallos"*, *"se produjo un fallo"*, etc.

Para satisfacer completamente las necesidades de producción debe existir consenso en el significado del término. No obstante, antes de introducir el concepto de modo de falla (desarrollado con mayor grado de detalle en el Capítulo 7) debemos definir qué se entiende por **falla** *(falla funcional).*

Se dijo que establecer una condición de funcionamiento para un equipo es una situación completamente subjetiva. De la misma forma, a la hora de calificar a un evento como **"falla"** suele existir discrepancia entre distintas opiniones. Por este motivo la definición más ajustada se logra relacionando el evento **falla** con el estado deseado de funcionamiento del equipo bajo análisis[2]. Para saber si un equipo falla hay que establecer qué se esperaba de él antes de sucederle la eventualidad.

Si no se tiene en cuenta el nivel de demanda establecido para la función que esperamos del activo, podrá suceder que una persona considere que el equipo falló mientras que otra opine lo contrario. Cuando el estándar de funcionamiento deseado[3] es explícito, pocas dudas quedarán para determinar si ha ocurrido una falla (Ver Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, sección 7.2 del Capítulo 7).

Decimos que una *falla* es la pérdida de capacidad, total o parcial, de un ítem mantenible para satisfacer un nivel de operación establecido por la función. Si sobre el componente se presenta dicho estado de no funcionamiento (insatisfactorio), no es posible alcanzar los estándares definidos para la operación.

Suele considerarse el término avería como un caso particular de falla. Cuando una falla impide el funcionamiento total del equipo, al que pertenece el elemento fallado, se dice que ocurrió una avería. A las averías se las vincula habitualmente con la detención del equipo o el incumplimiento total de su función. De todas formas no siempre es necesario discriminar las fallas de las averías.

---

*1 Usamos el término **fallo** como abreviatura de **modo de falla**.*

2 Los conceptos sobre Función, Falla Funcional y Modo de Falla aquí adoptados se basan en los criterios establecidos por la metodología RCM a través de la Norma SAE JA 1011 (Secciones 3.12, 3.13 y 3.14).

3 Expresión tomada de la metodología RCM y su norma reguladora.

Ejemplo 1.2.1
Un ventilador para forzar el flujo de material molido y en suspensión impulsa mineral hacia un silo de almacenamiento. Si se interrumpe completamente el flujo, existirán pocas dudas de que el transporte presenta una falla (avería). Hay otras situaciones, sin embargo, en que el equipo opera aparentemente en forma normal pero con un caudal de aire más bajo que el nominal. Para estos casos el sistema también presenta una falla, aunque todavía no con la pérdida total de función. A continuación se listan 10 ejemplos de falla *(falla funcional según la metodología RCM).*

1. *La luz de alarma no indica en el tablero de control.*
2. *El soplante impulsa menos de 45 m^3/h de aire, que es lo requerido por la operación.*
3. *El caudal de la bomba de agua es menor a 20 m^3/h necesarios para llenar el tanque.*
4. *El motor no mantiene la velocidad de la cinta entre 0,4 y 0,5 m/seg.*
5. *La válvula de seguridad no alivia la presión del reactor cuando ésta alcanza 6 Kg/cm^2.*
6. *El eje transmite la potencia con un valor de vibración en velocidad mayor a 10 mm/seg.*
7. *El aceite no es capaz de evitar la corrosión de los mecanismos.*
8. *La viscosidad del aceite está por debajo de 15 cSt.*
9. *El reactor no alcanza, en dos horas, los 89 °C requeridos para el proceso productivo.*
10. *El reductor no contiene el aceite completamente.*

Este ejemplo pone de manifiesto la necesidad de establecer cuantitativamente, en la medida de lo posible, el estándar de funcionamiento requerido para la función. En el primero de ellos esto no es posible dado que la luz de alarma indica o no indica; de igual manera en 7 y 10.

*Una **falla** es la consecuencia que se da como resultado de manifestarse, al menos, un **modo de falla.***

Modos de Falla
El corazón de la gestión de activos son los ***modos de falla (fallos).*** La única forma de obtener buenos resultados perdurables en el tiempo, es a través de un correcto manejo de los modos de falla. Aunque no nos demos cuenta, el trabajo diario de Mantenimiento consiste en corregir y evitar modos de falla, o bien mitigar sus consecuencias. No comprender este concepto, es no saber **porqué** se hace lo que se hace. Mantenimiento debe entender acabadamente porqué y para qué hace sus labores. Lamentablemente esto no se resume diciendo: *"para que los equipos funcionen correctamente"*.

Cada acción tomada (reactiva o pro-activa) tiene detrás, al menos, un modo de falla. Sabemos que es requisito establecer el estándar de funcionamiento para las funciones de un equipo. Luego, si se asume que los modos de falla son las **razones** o **causas** por las que no se cumple dicho estándar, lo efectuado desde mantenimiento debe "apuntar" a evitar la ocurrencia del modo de falla; lo demás, no tendrá sentido.

*Las posibles **causas** que originan una pérdida de función, y que eventualmente pueden ocurrir en alguna de las partes individuales de una máquina como proceso de degradación conocido o aleatorio, se denominan **modos de fallas.***

Un equipo es un conjunto de componentes relacionados tecnológicamente que podrá ser más o menos complejo en función de la cantidad de partes que lo constituyen y en función de la relación lógica que entre ellas exista. Esta agrupación será del tipo serie, paralela o compuesta *(Ver Confiabilidad de Sistemas).* Su complejidad dependerá también de la complejidad técnica de cada uno de sus elementos que, a los fines del análisis, se pueden subdividir en tantas partes como sea necesario aunque hasta cierto límite.

Los sistemas con muchos componentes (multicomponentes) contemplan más de un modo de falla, y el espectro del árbol de fallos de todo el sistema estará determinado por el aporte que cada elemento hace en forma individual. A su vez, puede ocurrir que cada componente individual tenga más de un modo de falla, o también que un mismo modo de falla se pueda repetir en más de un componente. Cualquiera sea la combinación, el desempeño del sistema estará signado por el de cada una de sus partes.

El párrafo anterior tiene un fuerte impacto en lo que más adelante se desarrolla como tasa de fallas (λ). La tasa de fallas de un sistema esta referida a la tasa de fallas de sus partes a través de los respectivos modos de falla.

Para el diseño u optimización de un Plan de Mantenimiento es muy importante determinar todos los modos de falla (potenciales y reales); sólo así será factible realizar un análisis base cero y alcanzar los estándares de disponibilidad requeridos[1].

Ejemplo 1.2.2
Se lista a continuación un **modo de falla** para cada **falla** descripta en el ejemplo anterior.

1. *Lámpara del tablero quemada.*
2. *Daños y fugas en el conducto de acometida a la operación.*
3. *Rotor de la bomba desgastado.*
4. *Errores de configuración en los parámetros de programación del PLC (Program Logic Controler).*
5. *Vástago de apertura trabado en cerrado.*
6. *Eje desbalanceado.*
7. *Contaminación del aceite con agua.*
8. *Aceite contaminado con combustible.*
9. *Suministro insuficiente de vapor.*
10. *Rotura del retén debido a golpes durante el montaje.*

Es muy probable que existan causas más profundas para los modos de falla enumerados. Debemos responder la pregunta, ¿por qué se dan estas condiciones? Por ejemplo, determinar cuáles son las posibles razones del *"suministro insuficiente de vapor"* del punto 9, nos debería conducir a sus causas *más raíces*. Estas últimas serán los verdaderos modos de falla.

Ejemplo 1.2.3
Tomemos el caso de un reductor con lubricación forzada que se compone, entre otras partes, del cuerpo o caja, rodamientos, engranajes, ejes, lubricante, juntas, retenes, filtro, bomba de aceite, cañerías de lubricación, conectores, presostato, sistema de control de aceite, etc.

El comportamiento de cada elemento y la relación técnica de causa y efecto que entre ellos se establezca, signará el desempeño del reductor completo a lo largo de su vida.

Según se dijo, si un equipo deja de cumplir sus funciones, parcial o totalmente, se produce una falla funcional; si el reductor deja de cumplir alguna de sus funciones es por causa de la aparición de uno o más modos de falla ocurriendo aislada o simultáneamente.

Establecidas las funciones, un listado de los posibles modos de falla y sus efectos, podría ser:

√ *Conexión desajustada en la cañería de alimentación de aceite (pérdida de aceite).*
√ *Retén dañado (pérdida de aceite).*
√ *Baja presión de aceite (que, a su vez, puede estar asociado a otro modo de falla primario en la bomba de lubricación)*
√ *Propiedades físicas ó químicas del aceite insuficientes o agotadas (daños en las superficies de contacto deslizante).*
√ *Filtro de aceite tapado (baja presión o caudal de aceite)*
√ *Venteo dañado (ingreso de partículas / elementos contaminantes).*
√ *Válvula de aceite trabada (daños en las superficies de contacto deslizante).*
√ *Rodamientos con juego excesivo (mal contacto deslizante entre partes).*
√ *Cañerías de aceite obstruidas (lubricación insuficiente).*
√ *Alarma por baja presión de aceite en estado de falla (lubricación insuficiente).*
√ *Presostato dañado (daños en la superficie de contacto deslizante).*
√ *etc.*

---

1 Para el diseño o mejora de Planes de Mantenimiento se recomienda la implementación de procesos de análisis FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) o RCM (Reliability Centred Maintenance). Ver Capítulos 5 y 7.

Si analizamos más profundamente cada uno de los modos de falla enumerados, tal vez se descubra que hay una causa aún *más raíz* a la descripta, y que sea la razón verdadera de la falla. Por ejemplo, la baja presión o caudal de aceite sobre los engranajes del reductor no es en rigor un modo de falla, es en realidad un efecto que se manifiesta como consecuencia de la actuación de otro modo de falla primario, por ejemplo, en la bomba de lubricación.

También deben ser considerados los modos de falla producidos por la acción negligente del personal, pero únicamente con el fin de tomar las acciones correctivas necesarias, enriquecer la experiencia y evitar su reiteración.

Ejemplo 1.2.4
Se enumeran a continuación algunos **modos de falla** vinculados a falencias en la operación de un equipo, o durante tareas de mantenimiento. (Estos modos de falla no guardan relación con los ejemplos anteriores).

1. *El retén queda dañado a consecuencia de un mal armado.*
2. *Exceso de ajuste en el rodamiento durante el montaje.*
3. *Válvula de vapor cerrada por omitir maniobra de apertura durante la operación.*
4. *Aceite contaminado con combustible durante el trabajo de reemplazo.*
5. *Se quema la fuente de alimentación por negligencia durante la puesta en marcha.*

1.2.2 Tipos de Fallas
Las fallas se agrupan conforme al siguiente criterio.

Falla Funcional
*Ocurre una **falla funcional** (también conocida como falla operacional) cuando el componente deja de satisfacer completamente la función requerida como resultado de manifestarse uno o más modos de falla*[1].
Ejemplo: Rotura del eje de un transportador; se detiene el transporte y la producción.
*Ejemplo: Un ventilador impulsa menos aire que el necesario para la función de transporte. Suele catalogarse equivocadamente a este fallo como un potencial defecto, debido a que el ventilador sigue funcionando. Sin embargo, esto no es cierto porque, habiéndose establecido un nivel mínimo de aire, la merma en el caudal es una **falla funcional** (no se satisface el estándar de operación especificado para la función).*

Falla Simultánea[2]
En los sistemas con redundancias o protecciones, se da una falla funcional simultánea cuando ocurre una falla en el equipo cargado o solicitado, mientras la protección o redundancia se encuentra también en estado de falla funcional ó avería (no disponible).
Ejemplo: Si el sensor de una alarma por alta temperatura se encuentra dañado al momento en que el sistema al que protege sufre efectivamente un exceso de temperatura, estamos en presencia de una falla simultánea.

Falla Sintomática o Potencial
Una falla sintomática es una condición de estado verificable (defecto o desviación incipiente) en los componentes o sus propiedades, que indica que una falla funcional está en proceso de ocurrencia, aunque el componente no haya dejado de cumplir completamente sus funciones. De no mediar acción alguna, la falla sintomática (irreversible) conducirá de cualquier modo a una falla funcional. Por regla general, la acción remediadora incluirá el reemplazo o restauración del componente.
Ejemplo: Vibración excesiva (falla sintomática) por daño en la pista interior de un rodamiento (modo de falla) sobre el que va montado un ventilador. La impulsión de aire todavía no se detuvo (ni disminuyó el caudal necesario) pero, de persistir la falla sintomática, derivará inevitablemente en la falla funcional del equipo. (Proceso Irreversible).
Cabe destacar que algunas fallas sintomáticas (dependiendo de la condición de estado) pueden ser reversibes.

---

1 Los modos de falla (y el efecto asociado) se analizan generalmente en forma independiente, lo que es correcto cuando la dependencia modal no es significativa. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario realizar un árbol de eventos (Ver Capítulo 5, punto 5.2.4.4).
2 También conocidas como Fallas Múltiples (punto 3.8 Sección 3 de la Norma SAE JA 1011 y página 9 de la norma MIL-2173 AS).

En ocasiones es factible aplicar técnicas de monitoreo que permiten tomar medidas correctoras desviando la tendencia, que de lo contrario, acabaría primero en una falla sintomática irreversible y luego en la falla funcional. Ejemplo: El recuento de partículas en un aceite (ISO 4406) se utiliza para monitorear el nivel de limpieza del lubricante. El tamaño y cantidad de partículas es un síntoma muy prematuro de futuras fallas en mecanismos. Con una acción de filtrado / cambio, se pueden evitar daños irreversibles sobre las superficies de fricción. (Proceso Reversible).

Falla Recurrente
Categoría de fallas funcionales repetitivas fuera de la frecuencia de ocurrencia establecida como aceptable. También se denominan crónicas y pueden ser causadas por un mismo modo de falla o por diferentes actuando simultáneamente.
Ejemplo: La falta de indicación de algún parámetro operativo en un sistema de control, puede ocurrir con mayor frecuencia que la esperada, lo que perjudica la operación.
El criterio de recurrencia también es válido para los modos de falla.

1.2.3 Tipos de Modos de Falla

Los modos de falla (fallos) se agrupan conforme a los siguientes dos criterios. El primero los estratifica en función del estado paramétrico en que se presentan, o bien de acuerdo al nivel de evidencia que manifiestan durante la operación.

Fallo Evidente[1]
Es un modo de falla que se pone de manifiesto (a través de la falla funcional) en forma evidente y bajo circunstancias normales de operación cuando ocurre por sí solo.
Ejemplo: Desbalanceo del eje de un transportador (modo de falla) y rotura final (falla funcional).

Fallo Oculto
Normalmente asociado a los perjuicios que ocasiona en las funciones que desempeñan los dispositivos redundantes o de protección (funciones ocultas). La falla funcional provocada por un modo de falla oculto, no es detectable en condiciones normales de trabajo. (Ver Mantenimiento Detectivo, Capítulo 5).
Ejemplo: El sensor dañado en una alarma por alta temperatura.

Fallo Recurrente
Caben las mismas consideraciones que en el caso de Falla Recurrente.

Fallo Dominante
Un modo de falla se llama dominante si provoca la mayor cantidad de fallas funcionales en el componente. Algunos elementos pueden fallar por una o dos razones principales y así definen el patrón de fallas del elemento. Por el contrario, cuando un componente puede presentar una falla como consecuencia de una gran cantidad de modos de falla con similares probabilidades de ocurrencia, se dice que el mismo no posee un modo de falla dominante.
Ejemplo: Desgaste del recubrimiento interior de una tolva de descarga de producto terminado. El proceso de abrasión sobre la superficie interior es una condición de deterioro dominante respecto al resto de los posibles modos de falla.

Fallo Común
Un modo de falla es común cuando puede afectar a más de un componente o equipo. Se debe prestar especial atención cuando se tienen equipos redundantes, en los que su ocurrencia puede producir la indisponibilidad tanto del equipo a resguardar como del instalado en stand-by. Se manifiesta en redundancias activas o pasivas.
Ejemplo: En el sistema de encendido redundante activo de los motores de combustión interna aeronáuticos, un modo de falla por desconexión eléctrica podría afectar simultáneamente a los dos circuitos en paralelo. (Ver Redundancia Activa Plena, sección 5.1.1 Capítulo 5).

---

1 Concepto basado en el punto 3.7, Sección 3 de la Norma SAE JA 1011.

Oportunamente se verá que, de acuerdo al modo de falla (y su patrón de fallas), puede ser más conveniente la aplicación de alguna acción de mantenimiento por sobre otra.

El segundo criterio agrupa a los modos de falla de acuerdo al **origen**, y se conoce como **agrupación por causa.**

De diseño

Son modos de falla debidos al mal diseño, errores en la estimación del contexto operativo o errores de cálculo tanto técnicos como de capacidad. Generalmente provocan fallas recurrentes de acuerdo a la categorización anterior.

Ejemplo: Corte frecuente en el cable de accionamiento del embrague de un camión por mal diseño en la cremallera de regulación. Este error de diseño provoca una tensión excesiva en el cable y su rotura frecuente. (Se trata, además, de un modo de falla recurrente y dominante).

De fabricación

Todo proceso productivo es factible de incurrir en errores de fabricación. Los sistemas de control de calidad buscan detectar las piezas defectuosas que impactan en la tasa de fallas del equipo, principalmente en el inicio de su vida operativa.

Ejemplo: Defectos en la fundición por inclusión durante la fabricación de piezas estructurales.

De traslado y montaje

Durante las tareas de montaje e instalación, o durante el traslado, suelen suceder daños sobre las partes componentes.

Ejemplo: Problemas en la operación de llenado en una máquina embotelladora de gaseosas debidas a un mal reglaje o ajuste incorrecto en el montaje (modo de falla).

De uso u operación

La falta de idoneidad en el uso u operación de equipos (generalmente por falta de capacitación), es una causa importante de falla en la actividad industrial.

Ejemplo: Se quema el motor eléctrico por caída de agua (modo de falla) durante la operación de limpieza.

Por eventos aleatorios de contexto

Muchas piezas no responden a un patrón de fallas tal que a partir de un determinado momento aumentan rápidamente su probabilidad de falla, sino que pueden fallar como consecuencia de una gran cantidad de modos de falla cuya posibilidad de ocurrencia es totalmente aleatoria. Bajo esta aleatoriedad pueden mencionarse las inherentes al equipo, las ambientales o las debidas al cambio repentino del contexto operativo.

Ejemplo: Rotura de los vidrios en una nave industrial causada por la caída de granizo (modo de falla completamente aleatorio).

Por desgaste natural o envejecimiento

También llamados paramétricos, son modos de falla que tienen una vinculación directa con la vida operativa del elemento.

Ejemplo: El mismo ejemplo de la tolva de descarga de producto terminado.

Falla	
Funcional	*Se presenta una falla funcional cuando un componente deja de satisfacer, parcial o totalmente, la función requerida.*
Sintomática o Potencial	*Una falla sintomática es una condición de estado verificable (defecto o desviación incipiente) en un componente o sus propiedades, que indica que una falla funcional está en proceso de ocurrencia aunque dicho componente no haya dejado, aún, de cumplir completamente sus funciones.*
Simultánea	*En sistemas funcionales con redundancias o protecciones, se presenta una falla simultánea cuando ocurre una falla en el equipo (o función) a proteger, mientras la protección o redundancia se encuentra también en estado de falla o avería (seguridad no disponible).*
Recurrente	*Falla funcional repetitiva fuera de la frecuencia aceptable de ocurrencia. También llamada crónica, puede ser causada por un mismo modo de falla o por diferentes, actuando simultáneamente.*

Modo de falla			
(Según el estado paramétrico)		*(Según el origen)*	
Evidente	*Modo de falla que se pone de manifiesto a través de la falla funcional, en forma evidente bajo las condiciones normales de funcionamiento, suponiendo que es el único que sucede en el sistema.*	*De diseño*	*Modo de falla ocasionado por un mal diseño (errores de estimación de contexto operativo, errores de cálculo, etc.).*
Oculto	*Modo de falla que ocurre en los dispositivos redundantes o de protección (funciones ocultas) no dotados de seguridad inherente. La falla funcional provocada por un modo de falla oculto no es detectable en condiciones normales de trabajo.*	*De fabricación*	*Modo de falla ocasionado durante el proceso de transformación o fabricación.*
		De traslado y montaje	*Modo de falla ocasionado durante las tareas de montaje e instalación, o durante el traslado del componente.*
Recurrente	*Las mismas consideraciones que en "falla recurrente".*	*De uso u operación*	*Modo de falla ocasionado por la falta de idoneidad en el uso u operación del equipo.*
Dominante	*Modo de falla que provoca la mayor cantidad de fallas funcionales en un componente.*	*Por eventos aleatorios*	*Modo de falla cuya probabilidad de ocurrencia es totalmente aleatoria (causas inherentes al equipo, ambientales, debidas al cambio repentino de contexto de funcionamiento, etc.).*
Común	*Modo de falla que puede afectar a más de un componente simultáneamente.*	*Por desgaste natural o envejecimiento*	*Modo de falla que tiene una vinculación directa con la vida operativa del elemento. También denominado paramétrico.*

Figura 1.2.2 Resumen de tipos de fallas y modos de falla.

Los parámetros que se describen a continuación se denominan **Índices de Clase Mundial**[1].

1.2.4 Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

Este parámetro establece el *período promedio entre dos fallas* de un elemento en un contexto de funcionamiento dado; las letras MTBF corresponden a *meantime between failures*.

Cuando nos referimos a un elemento, éste puede ser un equipo o un sistema complejo, con la condición que se repara luego de la ocurrencia de la falla.

Si se trata sólo de un ítem, matemáticamente puede expresarse como el tiempo establecido para operar (T_o), menos el tiempo por paradas no programadas (T_{np}), dividido el número total de fallas (Cf) detectadas durante el tiempo de operación.

$$MTBF = \frac{T_o - T_{np}}{Cf} \qquad (1.2.1)$$

En algunos casos suele aplicarse para analizar un conjunto de ítems independientes:

$$MTBF = \frac{(T_o \cdot n) - \sum_{i=1}^{n} T_{np(i)}}{\sum_{i=1}^{n} Cf_{(i)}} \qquad (1.2.2)$$

Siendo n la cantidad de equipos considerados y T_o el mismo para todos los ítems.

1 *Expresión utilizada por Lourival Tavares en su libro: Administración Moderna de Mantenimiento, Capítulo 4 sección 2.*

Para un conjunto de equipos en **línea**, el MTBF será:

$$MTBF = \frac{T_o - T_{np(MV)}}{Cf_{(MV)}} \qquad (1.2.3)$$

Donde $T_{np(MV)}$ es el tiempo de paradas no programadas que afectaron a la máquina de menor velocidad de la línea y $Cf_{(MV)}$, la cantidad de detenciones asociadas a esa misma máquina, independientemente de si la causa fue producida por cualquier otra.

La velocidad de una línea de producción está dada por la máquina o subproceso de menor velocidad. Las máquinas aguas arriba o abajo de ésta tendrán una sobre velocidad. Por lo tanto, podrá ocurrir que micro detenciones de las máquinas con mayor velocidad (antes o después del cuello de botella), no afecten a la línea. Para calcular el MTBF de toda la línea sólo es necesario tener en cuenta las paradas que afectaron a la de menor velocidad, además del tiempo total que esas fallas acumularon sobre la misma.

1.2.5 Tiempo Medio para la Falla (MTTF)

Cuando se considera un ítem, repuesto o elemento que se sustituye ante la falla, el concepto es medianamente parecido. Se denominado MTTF *(meantime to failure)*, o tiempo medio para la falla, e indica en promedio con qué frecuencia se produciría la falla del componente. El MTTF de una población estadística de unidades en funcionamiento (con reposición luego de cada falla) se obtiene de la siguiente forma:

$$MTTF = \frac{T_o \cdot n}{\sum_{i=1}^{n} Cf_{(i)}} \qquad (1.2.4)$$

Donde T_o es el tiempo de operación considerado para el análisis y n la cantidad de unidades activas. $Cf_{(i)}$ son las fallas ocurridas para cada unidad activa durante el tiempo T_o. La aproximación es tanto más válida cuanto más extenso es el período considerado y cuanto mayor es la cantidad de unidades involucradas.

Es importante aclarar que MTTF y MTBF son mutuamente excluyentes dado que para el cálculo del MTTF el tiempo de reparación es cero. No debe confundirse el período promedio para la falla (MTTF) con Vida Util. La vida útil es un caso especial del MTTF *(Ver Patrones de Falla)*. La vida útil es representativa cuando la dispersión de los períodos promedios para la falla de cada elemento de una determinada muestra, es baja; es decir, cuando casi todas las unidades fallan en tiempos muy parecidos. El MTTF sólo indica cual es el *período promedio de vida.*

Existen algunos casos en que no se puede lograr la *estabilización* del MTTF. De todas formas nos da una información valiosa respecto al grado de confiabilidad del elemento bajo análisis.

Ejemplo 1.2.5

Supongamos un ensayo a lo largo de 1.000 horas de funcionamiento con 100 elementos iguales y con reposición ante la falla. Si al cabo de dicho período aparece una falla, entonces el MTTF será de 100.000 horas. Esto no significa que podemos esperar que cualquier otro elemento idéntico a los probados dure todo este tiempo. Puede suceder que la mayoría de ellos no sobreviva a las 1.500 horas, en cuyo caso la tasa de fallas aumentará abruptamente a partir de allí y la probabilidad de que le ocurra una falla también se incrementará de la misma manera. Si esto sucede podremos decir que la vida útil es de 1.500 horas.

Si, por el contrario, no existe un momento a partir del cual aumenta considerablemente la tasa de fallas para la mayoría de los elementos ensayados, entonces no podemos hablar de vida útil. *(Ver Tasa de Fallas y Patrones de Falla)*. Cuando estamos ante un repuesto cuya vida útil es aleatoria (no depende de su edad) el MTTF no indica cuando puede fallar, sino su probabilidad de falla en un período dado.

De no existir historia registrada de un repuesto de vida útil aleatoria, se lo puede asimilar a otros de la misma tecnología y obtener un valor estimado e inicial para el MTTF.

Para determinar el MTTF total de un elemento complejo, que pueda tener más de un modo de falla, veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1.2.6
Supongamos que para un componente se determinaron dos posibles modos de falla, uno con un $MTTF_{(1)}$ de 8 años y el otro con un $MTTF_{(2)}$ de 25 años, el MTTF del sistema complejo ($MTTF_{(S)}$) se obtiene de:

$$(1 / MTTF_{(S)}) = (1 / MTTF_{(1)}) + (1 / MTTF_{(2)}) \qquad (1.2.5)$$

por lo tanto:

$$MTTF_{(S)} = \frac{MTTF_{(1)} \times MTTF_{(2)}}{MTTF_{(1)} + MTTF_{(2)}} \qquad (1.2.6)$$

De esta forma para nuestro caso:

$$MTTF_{(S)} = \frac{8 \times 25}{8 + 25}$$

$MTTF_{(S)} = 6{,}06$ años.

Así, para n modos de falla, el $MTTF_{(S)}$ se debe estimar por medio de la siguiente fórmula:

$$(1 / MTTF_{(S)}) = (1 / MTTF_{(1)}) + (1 / MTTF_{(2)}) + \ldots\ldots\ldots + (1 / MTTF_{(n)}) \qquad (1.2.7)$$

La ecuación 1.2.7 es válida únicamente si cualquier modo de falla desencadena la falla del componente.

1.2.6 Tiempo Medio para Reparación (MTTR)

En su forma más general, el tiempo medio para reparación (*meantime to repair*) es la relación entre el tiempo total de intervenciones por restauración T_{tr}, y el número total de reparaciones C_r. Es aplicable, además, para un conjunto de ítems cuyas características sean similares y cuando se trata de la misma reparación.

$$MTTR = \frac{T_{tr}}{C_r} \qquad (1.2.8)$$

Este índice debe aplicarse a equipos cuyo tiempo de reparación es significativo con respecto al tiempo de operación. La inversa del MTTR suele tomarse como un indicador de la Mantenibilidad y se denomina tasa de reparación ε.

$$\varepsilon = \frac{1}{MTTR} \qquad (1.2.9)$$

1.2.7 Tasa de Fallas

Los equipos o sistemas complejos dejan de funcionar, o lo hacen en forma incorrecta, cuando alguna de sus partes manifiesta un estado indeseable de funcionamiento. Generalmente (excepto montajes en paralelo) la manifestación de un modo de falla produce la avería total o parcial del sistema, pues se puede asumir que todos los elementos se comportan como una cadena lineal desde el punto de vista **funcional**, más allá de su distribución física en el conjunto del que forman parte.

Cuando hablamos de tasa de fallas λ, nos referimos en rigor a la de cada modo de falla, cuya combinación resultará en la tasa de fallas del conjunto λ_s.

Conceptualmente la tasa de fallas es aplicable a nivel componente, es decir, la mínima parte en que podemos subdividir al sistema, y al que se le pueden determinar sus modos de falla y la estadística que los gobierna.

Dada una determinada pieza, y habiendo funcionado satisfactoriamente hasta un tiempo t, se define la tasa de fallas (o función de riesgo) como la probabilidad condicional de que sufra un fallo en un instante de tiempo siguiente [t+Δt].

Es un parámetro estadístico que resulta de observar el comportamiento de una cantidad ensayada de elementos idénticos. Su valor es proporcional al intervalo de tiempo Δt y a la cantidad de elementos que pudieron sobreponerse al fallo hasta t.

La tasa de fallas es función del tiempo y su expresión más general queda determinada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)} \qquad (1.2.10)$$

en la que f(t) es la función densidad de fallas y C(t) la confiabilidad del componente.

Existe una unidad normalizada, denominada FIT (failure in time), que mide la cantidad de fallos en 10^9 horas[1].

$$1\ FIT = 1 \times 10^{-9}\ [1/horas] \qquad (1.2.11)$$

Muchas veces se recurre a ensayos para su estimación. Siendo que los mismos deben estar acotados, se los restringe de acuerdo a dos criterios distintos.

El primero corresponde a aquellos ensayos que finalizan cuando se alcanza un número preestablecido de fallos F_r sobre un total de *n* elementos probados. El segundo tipo de ensayo finaliza luego de un tiempo t, también predefinido y para un total de *n* elementos. En los dos casos los valores F_r, t y *n* se establecen al inicio de las pruebas.

En otras ocasiones, cuando la situación física de los componentes lo permite, se recurre a **ensayos acelerados** utilizando variables de aceleración. Modelos como el de Eyring o Ley de Arrhenius, son algunas de las técnicas utilizadas. Se recomienda la consulta de bibliografía especializada en métodos de aceleración de ensayos[2].

1.2.8 Confiabilidad

Vimos que uno de los dos atributos para garantizar la disponibilidad, es la confiabilidad. El estudio de la confiabilidad se originó a principios de siglo en la industria aeroespacial. Tuvo una creciente evolución hasta nuestros días con la ayuda de la industria militar, aeronáutica y nuclear. Técnicas como el "Análisis del Árbol de Fallos", "Análisis del Arbol de Sucesos" y los "Diagramas de Decisión", utilizan la confiabilidad como herramienta clave para su desarrollo.

A finales de la década del 80' se publican las primeras normas internacionales IEC, que establecen buenas prácticas y estándares básicos de mantenimiento relacionados a Seguridad Funcional de sistemas tecnológicos cuyo perjuicio para la seguridad de las personas o el entorno, es alto. Además, con motivo de la aplicación de nuevas herramientas de mejora como la "Gestión de Seguridad Industrial Basada en Riesgo", se hace necesario contar con cierta base de cálculo que soporte la teoría del análisis del riesgo.

También conocida como *fiabilidad*, resulta ser una medida de la garantía de funcionamiento que podemos esperar de un componente al cabo de un tiempo de utilización partiendo de un estado satisfactorio. La confiabilidad inherente (diseño + mejoras) de un sistema actuando en un contexto dado, es una probabilidad que resulta de combinar las probabilidades de no falla de sus partes; sin embargo, su valor varía conforme lo hace el tiempo.

---

1 Introducción al Proyecto de Ingeniería de Enrique Villamil García y Miguel J. García Hernández, página 108.
2 "Ensayos Acelerados" de Referencia 1, página 111.

El límite de subdivisión de un equipo será aquel en el que sea posible establecer los modos de falla particulares y sobre los que se puede determinar un patrón de falla.

Se trata de una teoría netamente estadística (regida por las leyes de la probabilidad) que se ocupa fundamentalmente de determinar cuáles son las posibilidades de que un equipo funcione sin fallas durante un periodo de utilización; sin tener en cuanta las causas que provocaron dichas fallas ni con qué frecuencia han aparecido. La confiabilidad es útil para predecir el comportamiento de un elemento (reparable o no), en función de los datos estadísticos obtenidos de otros elementos iguales o similares. Los resultados serán "confiables" en la medida que el comportamiento estadístico del elemento bajo estudio sea el mismo que aquellos pertenecientes al lote del cual se extrajo la información para estimar las variables.

Por ejemplo, siempre debe asegurarse la repetibilidad en el proceso de fabricación de cada elemento, calidad de los materiales, insumos, controles, etc. si se pretende contar con datos seguros. Es común que un mismo tipo de componente provisto por dos proveedores, tengan distinta confiabilidad.

Por último, cabe recordar que la confiabilidad debe establecerse para un determinado contexto operativo (nivel de exigencia). Si éste cambia, posiblemente también lo haga la confiabilidad.

Ejemplo 1.2.7
La probabilidad de que un reductor opere sin averías durante un año, es 0,97. Confiabilidad = **97%**

La realidad es bastante más compleja
Resulta oportuno detenerse a analizar algunos conceptos muy importantes referidos a lo que teóricamente veremos en los puntos subsiguientes sobre **confiabilidad**, y lo que resulta luego de los sistemas tecnológicos funcionando en un **contexto operativo real.**

Cuando estudiamos la confiabilidad y obtenemos ecuaciones y curvas de comportamiento, nos referimos a la confiabilidad inherente o intrínseca de los elementos aislados del sistema al que pertenecen. Una máquina está constituida por decenas, cientos y a veces miles de partes; y cada una podrá fallar de forma distinta. Además, cada componente puede sufrir una falla en más de una forma; es decir, tener más de un **modo de falla**.

Adicionalmente, dentro de los posibles modos de falla se deben considerar los introducidos por las personas. Estos pueden darse por **error técnico** (falta de capacitación, formación, etc.), **negligencia inconsciente** (desatención, desconcentración, exceso de confianza, etc.) o **errores voluntarios** (falta de actitud, motivación, incentivo o sabotajes, etc). La confiabilidad de un sistema siempre es afectada por la **confiabilidad humana**.

La cantidad total de modos de falla de una máquina se obtiene como el producto del número de piezas (elementos) por la cantidad de modos de falla de cada una de ellas; sin considerar la relación causa - efecto que pueda existir entre cada uno.

En realidad, considerando esa relación, a mayor complejidad técnica, mayor será el acoplamiento e interferencia entre sus partes (y entre sus modos de falla). El patrón de fallas que normalmente se obtiene como la "suma directa" de los aportes de cada elemento del sistema, es sólo una aproximación pues descuida el factor de interferencia que entre los modos de falla puede existir[1].

Así mismo, a medida que se realizan reemplazos de componentes, las vidas particulares de cada uno comienzan en instantes de tiempo diferentes. Cuando uno de los elementos fue recientemente reemplazado, otro puede estar transitando la mitad de su período de utilización, en cuyo caso las tasas de fallas instantáneas serán diferentes. Además, cada pieza generalmente tiene una Vida Media distinta a su propio MTBF, y los MTBF de los componentes no necesariamente coinciden.

Todo lo anterior indica que la complicación de establecer un patrón de fallas de todo un sistema completo sin primero determinar el de cada uno de sus componentes, sea aún mayor. Es cada vez más frecuente que el patrón de fallas de los equipos no responda exactamente como lo hacían los elementos simples del pasado.

---

1 Ver Sección 8.4 del Capítulo 8, "Programación Integral y Preparación del Mantenimiento".

Esforzarse en estabilizar el MTBF de una máquina completa puede resultar una tarea sin sentido siendo que, además, su sola estabilización no nos da garantías sobre la exactitud de ocurrencia de la próxima avería. No así de un elemento aislado con una pequeña cantidad de modos de falla. Es necesario considerar, además, que un incremento del MTBF no significa un aumento proporcional de la confiabilidad del componente, sobre todo para valores superiores al 95%.

Cabe esta aclaración para separar lo que en teoría se estudia como el comportamiento **de un modo de falla** (o una cantidad muy reducida y dominante), de lo que la complejidad propia de un sistema real tiene como patrón de comportamiento.

Función de densidad

Una función de densidad de probabilidad f(x) es la relación que existe entre los valores de una variable aleatoria *(x)*, y sus probabilidades correspondientes. Esta variable aleatoria, que generalmente es el tiempo calendario, en rigor puede representar cualquier otra magnitud como horas de marcha, ciclos, despegues o distancia recorrida. Es decir, cualquier magnitud ligada al uso. Los valores que adopta la variable aleatoria *(x)* pueden ser continuos o discretos.

Para el caso en que los valores de la variable sean continuos, la función de densidad f(t) puede representar los fallos que le suceden a un equipo en un instante de tiempo t, siendo t la variable aleatoria. Así, la función de densidad acumulada F(t) es la probabilidad acumulada en un intervalo $(t_0; t_1)$, y es equivalente al área bajo la curva de f(t) desde el instante t_0 hasta t_1.

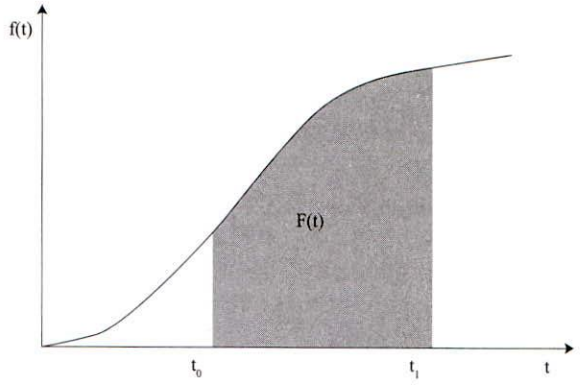


Figura 1.2.3
Función de densidad acumulada F(t) para $t_0 < t < t_1$.

Dada una ley de densidad del tipo f(t) continua, la probabilidad de que se produzca un fallo en el intervalo $[t_0; t_1]$, es decir la "desconfiabilidad", será:

$$F(t) = \int_{t_0}^{t_1} f(t)\, dt \qquad (1.2.12)$$

Si F(t) es la probabilidad de que se produzca un fallo, 1 – F(t) es la probabilidad de que no ocurra.

$$C(t) = 1 - F(t) \qquad (1.2.13)$$

Se define la Confiabilidad C(t) como la probabilidad de que un componente o equipo satisfaga las funciones establecidas sin fallas durante un tiempo dado y en un contexto definido.

Si bien el MTBF (tiempo medio entre fallas) fue definido anteriormente a través de la ecuación 1.2.1., en su forma más general, se define como la esperanza matemática de la variable aleatoria (t).

$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} t\, f(t)\, dt = \int_0^{\infty} C(t)\, dt$$

donde f(t) es la función de densidad de fallos.

Ley de distribución Exponencial

Son muchas las leyes capaces de describir el comportamiento o aparición de los modos de falla a lo largo de la vida económica de un componente. Para el caso de variables continuas, y de acuerdo a la etapa de su vida en que se encuentre, será necesario utilizar diferentes leyes de distribución.

Como vimos, C(t) representa la probabilidad de que un ítem se encuentre operativo al cabo de cierto tiempo *t*. Expresar la Confiabilidad a través de una distribución exponencial es muy común para componentes eléctricos, electrónicos y algunos mecánicos.

Cuando se analizó anteriormente el período promedio para la falla (MTTF), se dijo que podía usarse como un indicador aproximado de "confiabilidad". Si bien esto es cierto, resulta más conveniente plantear una función de densidad como la mostrada en la figura 1.2.5, cuya expresión es del tipo:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad t > 0 \text{ y } \lambda > 0 \tag{1.2.14}$$

La tasa de fallas λ para el caso de distribución exponencial adopta un valor constante e igual a:

$$\lambda = \frac{Cf}{T_0} = \frac{1}{MTTF} \tag{1.2.15}$$

T_o es el tiempo de operación.

Por ejemplo, para $\lambda = 0{,}05$ la función tasa de fallas se ilustra en la figura 1.2.4.

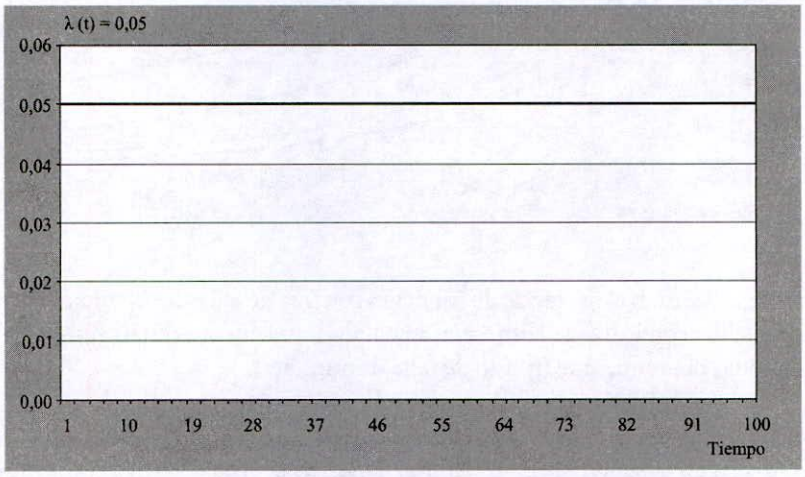


Figura 1.2.4
Tasa de fallas constante (λ=0,05) para distribución exponencial.

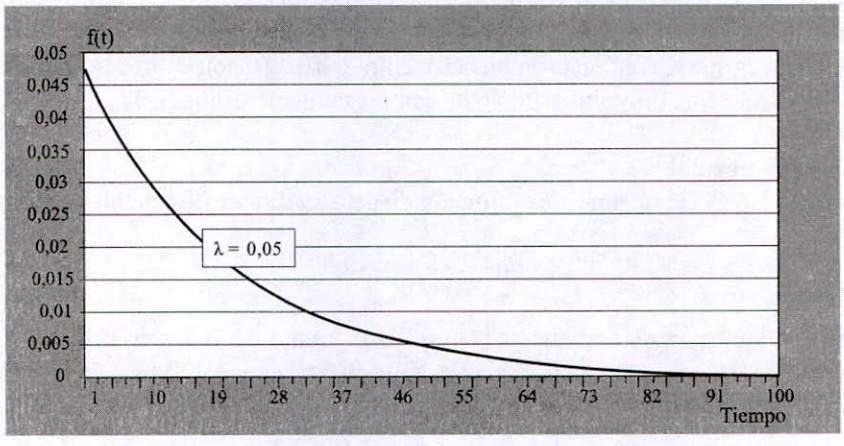


Figura 1.2.5
Función de densidad de fallos f(t) para una ley exponencial.

Algunos componentes extremadamente confiables alcanzan tasas de falla λ del orden de 10^{-7} fallos por hora. Elementos con tasas de falla superiores a 10^{-4} se consideran poco confiables.

Resolviendo la función de densidad para la ley exponencial, se tiene:

$$F(t) = \int f(t)\, dt = 1 - e^{-\lambda t} \qquad (1.2.16)$$

La ecuación 1.2.16 representa la probabilidad que se produzca un fallo durante el tiempo t.

Consecuentemente la Confiabilidad para esta ley, será:

$$C(t) = 1 - F(t)\, dt = e^{-\lambda t} \qquad (1.2.17)$$

Por lo tanto:

$$C(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(t/MTTF)} \qquad (1.2.18)$$

Para diferentes valores de $\lambda = 1/MTTF = cte$, se tiene:

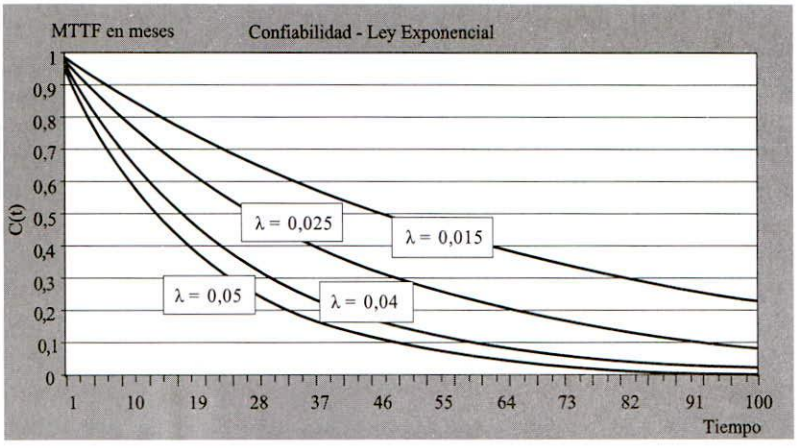


Figura 1.2.6 Curvas típicas de Confiabilidad para diferentes MTTF.

Los fallos que más se ajustan a esta ley de distribución con tasa de fallas constante, se dan en la electrónica, pero también en muchos contextos de la mecánica cuando los elementos están sujetos a fallos de diversas causas, y no a una causa predominante **(modo de falla dominante).**

En un rodamiento, el inicio del proceso de falla dependerá, entre otras cosas, de la velocidad de rotación, la carga aplicada, daños en la superficie de rodadura, daños en la pista externa producidos antes o durante la instalación, temperaturas de servicio, calidad, cantidad y grado de limpieza del aceite lubricante, desalineación del eje, materiales y calidad de la construcción, contaminación, etc. Es decir, cada rodamiento tendrá un período de vida diferente que estará signado por su historia particular y ésta, a su vez, dependerá de múltiples factores independientes que se combinan y potencian entre sí para generar el proceso integral de falla. En la práctica, un rodamiento constituye un ejemplo de comportamiento exponencial.

Ley de distribución normal

Otra ley de distribución es la normal, cuya función de densidad se expresada mediante:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}\, e^{-(t-\mu)^2 / 2\sigma^2} \qquad -\infty < t < \infty \qquad (1.2.19)$$

Donde μ es el valor esperado o media, σ la desviación estándar y σ^2 la varianza.

La representación de la función de densidad de fallos f(t) y la confiabilidad C(t), se pueden observar en las figuras 1.2.7 y 1.2.8 respectivamente.

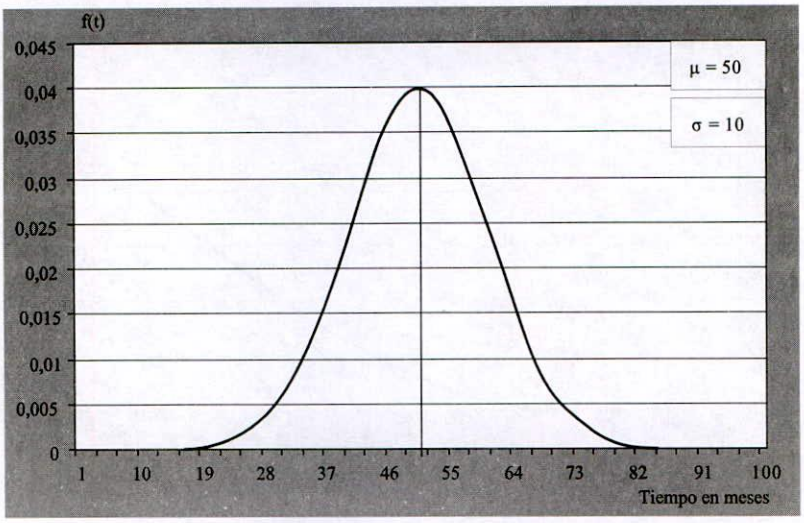


Figura 1.2.7 Función de densidad f(t) para una distribución normal.

La ley normal de fallos establece que alrededor del 95% de ellos ocurren entre t = (μ-2σ) y t = (μ + 2σ). Para determinar los valores de C(t), se debe resolver la expresión

$$C(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2}\, dt \qquad (1.2.20)$$

No pueden obtenerse valores matemáticos en forma directa, sino a través de tablas o cálculo numérico.

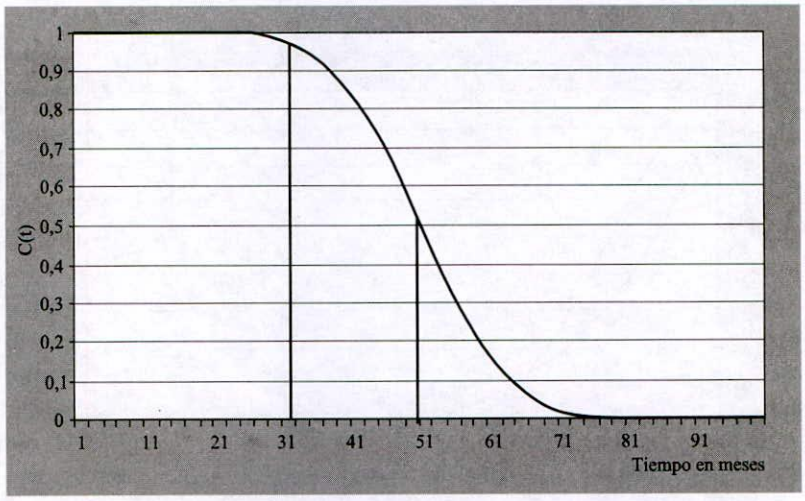


Figura 1.2.8 Función de confiabilidad C(t) para una distribución normal.

La mayoría de los elementos fallan en μ=50 meses y para obtener confiabilidades cercanas a 0,99 el tiempo de utilización debe estar muy por debajo de μ_{50}. Por ejemplo, para lograr una confiabilidad de 0,97 el tiempo de utilización t debe ser menor a 31 meses. Ver figura 1.2.8.

Según la ecuación 1.2.10, la tasa de fallas queda definida por la relación entre f(t) y C(t) como se ve en la figura siguiente.

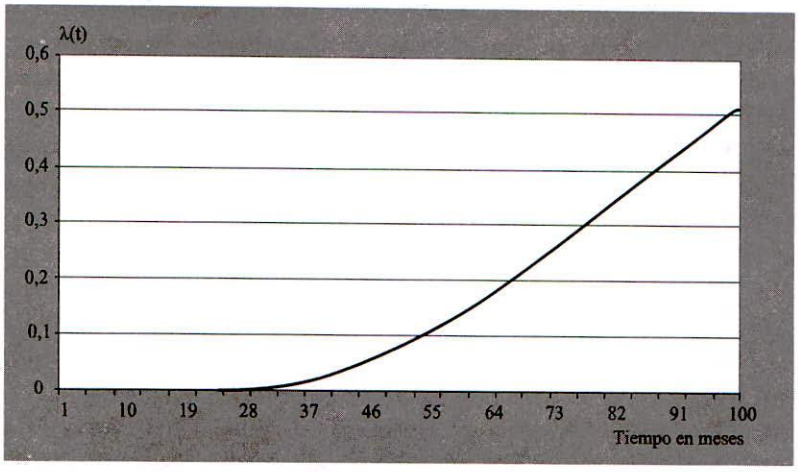


Figura 1.2.9
Función tasa de fallas λ(t) para ley de distribución normal.

Ley de distribución de Weibull

La ley de distribución de Weibull es la más general porque, de acuerdo a los valores que adopten sus constantes, es posible obtener otras funciones de distribución.

Su función de densidad de probabilidad queda expresada por:

$$f(t) = \alpha \beta t^{(\beta-1)} e^{-\alpha t^{\beta}} \qquad (1.2.21)$$

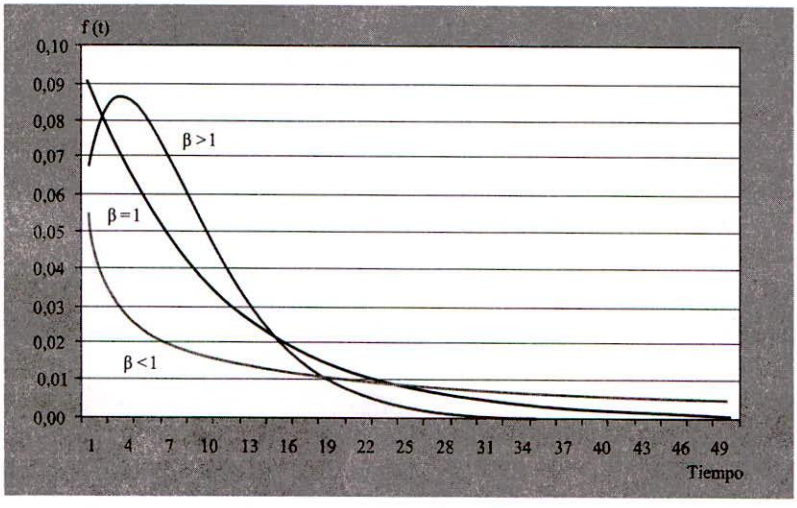


Figura 1.2.10
Función de densidad f(t) para distintos valores de β en la distribución de Weibull.

En ella, α y β son los parámetros de escala y forma, respectivamente. La función de Confiabilidad C(t) para la ley de distribución de Weibull, es:

$$C(t) = e^{-\alpha t^{\beta}} \qquad (1.2.22)$$

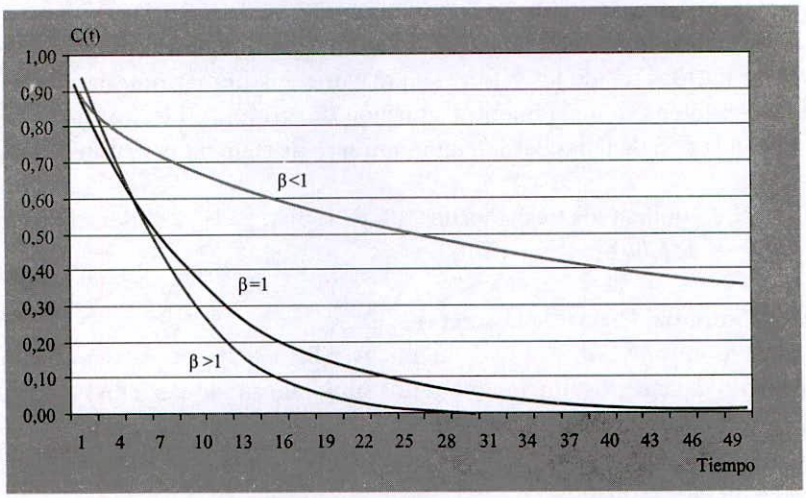


Figura 1.2.11
Función de Confiabilidad C(t) para distintos valores de β en la distribución de Weibull.

En la práctica, para obtener los valores de α y β se utilizan métodos gráficos.

La tasa de fallas quedó establecida por la ecuación 1.2.10, por lo que haciendo los reemplazos correspondientes para f(t) y C(t), se tiene:

$$\lambda(t) = \alpha \ \beta \ t^{(\beta-1)} \qquad (1.2.23)$$

Conforme α y β varían, la tasa de fallas adoptará valores diferentes a lo largo del tiempo. Los siguientes son gráficos de λ en función del tiempo para diferentes valores de β.

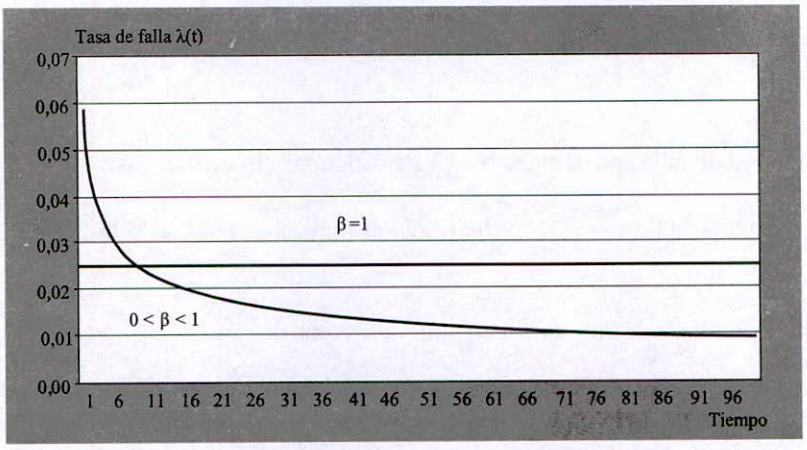


Figura 1.2.12
Tasa de falla cuando β adopta valores menores o iguales a 1.

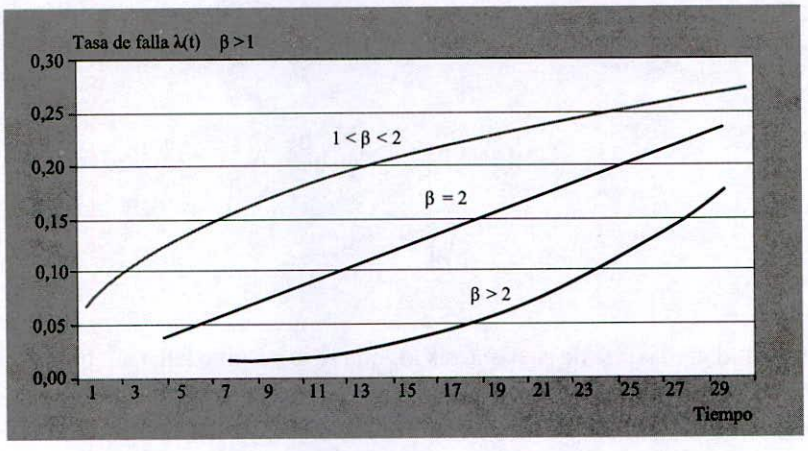


Figura 1.2.13
Posibles comportamientos de la tasa de fallas cuando β adopta valores mayores a 1.

Cuando β es mayor que uno, la función tasa de fallas $\lambda(t)$ puede adoptar comportamientos como los ilustrados en la figura 1.2.13. Cuando los valores son mayores a 3, nos encontramos ante situaciones de alto desgaste, corrosión intensiva o alguna otra situación de erosión. El lector puede consultar tablas específicas que indican la tasa de fallas para un gran número de elementos y sus modos de falla correspondientes.

Obsérvese que si se combinan los tres entornos, $[0<\beta<1;\ \beta=1;\ \beta>1]$ se obtiene la conocida curva de la "bañera". *(Ver patrones de falla).*

Ley de distribución Binomial (Variable Discreta)

Sea un sistema constituido por n dispositivos idénticos y listos para operar en cualquier momento. Iniciado el experimento de hacerlos funcionar a todos simultáneamente, puede suceder que fallen (no operen) 0, 1, 2, ... ó n de los elementos requeridos.

La variable aleatoria x es la cantidad de elementos que fallan del total de n, e indica el número de "fracasos" sobre n elementos probados.

Asimismo, cada uno de los dispositivos tiene una probabilidad p de fallar y una probabilidad $q = 1-p$ de no fallar. La probabilidad de falla de cada uno se considera independiente del estado de falla de cualquiera de los otros.

La probabilidad de que exactamente x equipos fallen (por un mismo modo de falla) sobre los n idénticos con una arquitectura en paralelo y prestos para operar, se expresa mediante la distribución Binomial para variable discreta dada por:

$$f(x) = P\,(x \text{ en } n) = \binom{n}{x} p^x\, q^{(n-x)} \qquad (1.2.24)$$

para $x = (0,1,2,\ldots\ldots, n)$ (1.2.25)

donde,
$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!\,(n-x)!} \qquad (1.2.26)$$

p es la probabilidad de falla constante, o bien λ bajo algunas circunstancias.

Para el caso particular en que $n = 1$ la distribución binomial recibe el nombre de *distribución de Bernoulli*[1].

La probabilidad acumulada de que fallen x equipos de un total de n, queda expresada por:

$$F(x \text{ en } n) = \sum_{i=x}^{n} \binom{n}{i}\ p^i\,(1-p)^{(n-i)} \qquad (1.2.27)$$

Si n es el total de equipos, y se necesitan al menos $j = n - x$ funcionando correctamente para garantizar el buen desempeño de todo el conjunto, la probabilidad de éxito con λ igual y constante para todos, será:

$$C(x \text{ en } n) = 1 - \sum_{i=x+1}^{n} \binom{n}{i}\ \lambda^i\,(1-\lambda)^{(n-i)} \qquad (1.2.28)$$

con
$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!\,(n-i)!}$$

y donde x es la cantidad máxima de elementos a los que se le permite fallar sin que el conjunto falle.

---

1 Probabilidad y Estadística Serie Schaum, página 117.

Esta ley de distribución representa la probabilidad de éxito o fracaso que se tendrá sobre un grupo de *n* equipos listos para funcionar, pero inicialmente todos en "espera".

Muchos sistemas de seguridad se estudian a través de esta distribución.

Ley de distribución de Poisson (Variable Discreta)

Una variable aleatoria *x* tiene una distribución de Poisson (o de los sucesos raros[1]) cuando la probabilidad de *x* fallos en un tiempo *t* está dada por:

$$P(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \qquad (1.2.29)$$

para x = (0, 1, 2, 3, ...)

Donde λt es el valor medio de fallos esperados en el tiempo t, teniendo todos los componentes del arreglo el mismo λ.

$P(0) = e^{-\lambda t}$ probabilidad de ningún fallo durante t

$P(1) = \lambda t\, e^{-\lambda t}$ probabilidad de un fallo durante t

$P(2) = \frac{(\lambda t)^2 e^{-\lambda t}}{2}$ probabilidad de dos fallos durante t

$P(x) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}$ probabilidad de x fallos durante t

Si por ejemplo se tienen *n* elementos y *n-1* es la cantidad en reserva (stand-by), el sistema queda fuera de servicio cuando fallan los *n* en el tiempo t; asumiendo que cualquier fallo sobre el elemento interrumpe completamente su funcionamiento.

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \qquad (1.2.30)$$

Siendo que es requisito que fallen todos los componentes para la falla de todo el sistema:

$$C(t)_s = e^{-\lambda t} + \lambda t\, e^{-\lambda t} + \ldots + \frac{(\lambda t)^{n-1} e^{-\lambda t}}{(n-1)!}$$

$$C(t)_s = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{[(\lambda t)^i e^{(-\lambda t)}]}{i!} \qquad (1.2.31)$$

Este modelo de distribución se diferencia de los anteriores en que siendo *n* la cantidad total de componentes, el fallo de uno de ellos (el único que se encuentra en operación) provoca la utilización de los *n-1* restantes.

---

1 Expresión utilizada en Estadística I y Probabilidad, de J. Martín-Pliego López y L. Ruiz-Maya Pérez, página 349.

1.2.9 Confiabilidad de Sistemas

Los sistemas productivos son conjuntos de equipos o ítems agrupados de tal manera de satisfacer un mismo fin. El sistema puede ser tan amplio como uno quiera, sólo se deben establecer claramente sus límites.

Definir la manera de calcular la confiabilidad de los sistemas, en función de la relación de funcionamiento que existe entre sus componentes, es necesario a los efectos de determinar los niveles de mantenimiento requeridos para el conjunto.

Es muy importante destacar que los componentes de un sistema pueden estar agrupados o montados físicamente de diferentes maneras: serie, paralelo o una combinación de ambos.

No obstante, la decisión sobre el tipo de red a adoptar para calcular la confiabilidad total no dependerá del arreglo físico de sus componentes únicamente, sino también de la forma en que la falla de cada uno incide en la detención de todo el sistema. La confiabilidad de dos elementos eléctricos podrá ser calculada como una red en paralelo, aunque su montaje en el circuito sea en serie. *(Ver Mantenimiento Detectivo).*

1) Un grupo de componentes activos en línea (sin pulmones intermedios):

La falla de cualquier elemento de la cadena provoca la detención del sistema completo. Se debe entender como alineación en serie, no únicamente la que se presenta en forma física, sino también aquella funcional.

Sea $C(x)_i$ la confiabilidad de cada componente en función de una variable aleatoria X:

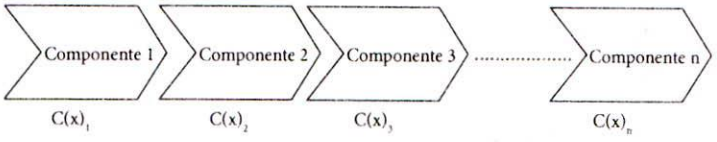


Figura 1.2.14
Sistema de activos en línea.

$$C(x)_s = C(x)_1 \cdot C(x)_2 \cdot C(x)_3 \cdot \ldots\ldots \cdot C(x)_n$$

$$C(x)_s = \prod_{i=1}^{n} C(x)_i \qquad (1.2.32)$$

La Confiabilidad total del sistema se obtiene, entonces, como el producto de las confiabilidades de sus componentes[1].

Ejemplo 1.2.8

En el ejemplo 1.2.6, se tiene un componente con dos posibles modos de falla. Se trata de una configuración en serie del tipo funcional, pues de presentarse cualquiera de los dos modos de falla, el componente (línea) queda fuera de servicio. El $MTTF_{(1)}$ es 8 años y $MTTF_{(2)}$ es 25 años. Asumiendo una distribución del tipo exponencial para ambos fallos, calcular la confiabilidad del sistema para los 6 meses de funcionamiento:

$$\lambda_1 = 1 / MTTF_{(1)} = 0{,}125 \text{ fallos/año}$$

$$\lambda_2 = 1/ MTTF_{(2)} = 0{,}04 \text{ fallos/año}$$

$$C(t)_s = C(t)_1 \cdot C(t)_2 = e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t}$$

$$C_{(6\ meses)s} = e^{-(0{,}125 \times 0{,}5)} \times e^{-(0{,}04 \times 0{,}5)} = 0{,}9394 \times 0{,}9802 = \mathbf{92{,}08\%}$$

y también,

$$C_{(6\ meses)s} = e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t} = e^{-(0{,}125 + 0{,}04) \cdot 0{,}5} = 0{,}9208 = \mathbf{92{,}08\%}$$

---

1 No todos los sistemas en serie obedecen a la ley de Lusser. Para sistemas mecánicos sujetos a amplios rangos de carga la confiabilidad del conjunto tiende a la confiabilidad de un componente particular de la cadena. Ver Safety, Reliability and Risk Management[1998] Sue Cox and Robin Tait, página 19 y su referencia a Carter (1986).

Para el caso de los arreglos en serie cuya función de densidad es exponencial, la tasa de fallas λ_s total es la suma de la tasa de fallas de cada componente o de cada modo de falla para un mismo elemento, y su comportamiento también es del tipo exponencial. La confiabilidad es tanto más baja cuanto mayor sea la cantidad de equipos que contenga la cadena, pues el valor total del sistema será menor que la menor confiabilidad de la línea.

La ventaja de los diseños simplificados de alta Confiabilidad radica en la minimización del número de componentes en serie[1].

2) Un grupo de componentes independientes entre sí:

En algunas ocasiones puede ser preciso estimar la Confiabilidad de un conjunto de activos independientes. Suele utilizarse únicamente con fines estadísticos.

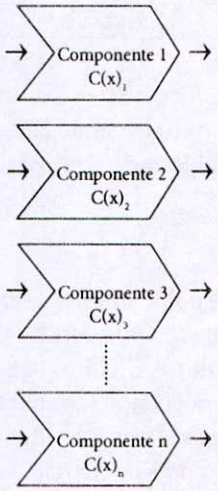


Figura 1.2.15
Sistema de activos en paralelo e independientes.

$$C(x)_s = [C(x)_1 + C(x)_2 + C(x)_3 + \ldots\ldots + C(x)_n] / n$$

$$C(x)_s = \text{Promedio de los } C(x)_i \qquad (1.2.33)$$

3) Un grupo de componentes redundantes y activos (Variable Aleatoria Continua)

Si contamos con componentes redundantes y activos para una misma función (caso que se presenta en muchas configuraciones de alta confiabilidad) en los cuales para que se produzca la falla del sistema es menester que falle la totalidad de ellos, la confiabilidad del conjunto para una variable aleatoria continua será:

$$C(x)_s = 1 - [(1 - C(x)_1) \cdot (1 - C(x)_2) \cdot \ldots\ldots \cdot (1 - C(x)_n)]$$

$$C(x)_s = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - C(x)_i] \qquad (1.2.34)$$

Siendo

$[1 - C(x)_i]$ la probabilidad de que el componente i esté en estado de falla y $C(x)_s$ la probabilidad de que al menos uno de los componentes esté disponible.

La ecuación 1.2.34 sólo se aplica para los casos en que las Confiabilidades $C(x)_i$ de los componentes redundantes son independientes entre si.

---

1 Safety, Reliability and Risk Management[1998] Sue Cox and Robin Tait, página 18.

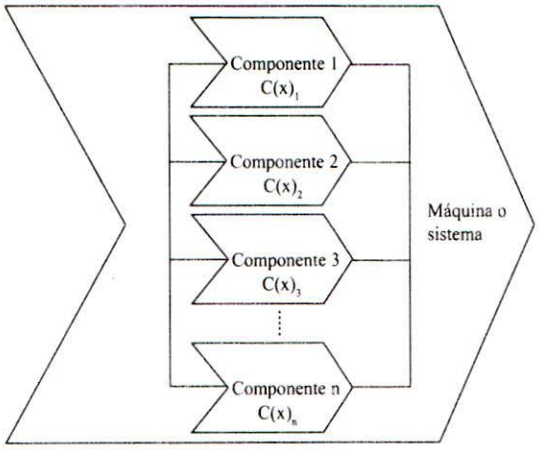


Figura 1.2.16
Sistema de activos redundantes.

En estos casos, la falla de cualquier elemento $C(x)_i$, actuando por sí sólo e independiente, no afecta la confiabilidad del grupo porque al menos uno asume la ejecución de todas las funciones establecidas como necesarias. Esta ecuación es aplicable inclusive para los casos en que la confiabilidad no es la misma en todos los componentes.

Ejemplo 1.2.9
Cierto motor de combustión interna posee doble sistema de encendido. El mismo cuenta con dos circuitos independientes capaces de entregar, a todos los cilindros, la energía suficiente para la combustión. Por cálculos estadísticos se sabe que cada uno de los circuitos tiene una tasa de fallas de 1×10^{-4} f/h. Calcular la confiabilidad del sistema de encendido para cuando hayan transcurrido 1.000 horas de funcionamiento.

Asumiendo que la variable aleatoria x es el tiempo y que cada circuito responde a la ley de distribución de fallas exponencial, para las 1.000 horas de marcha se tendrá:

$$C_{(t)s} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2$$

$$C_{(1000)s} = 1 - (1 - e^{-(0{,}0001 \times 1000)})^2 = \mathbf{99{,}09\%}$$

Ejemplo 1.2.10
Un sistema hidráulico de apertura posee tres válvulas automáticas iguales dispuestas con una configuración en paralelo. El sistema puede operar normalmente sólo con una de ellas, aunque las tres funcionan continuamente con el fin de aumentar la Confiabilidad integral. Si bien las válvulas aumentan considerablemente su probabilidad de falla a partir de una determinada cantidad de ciclos de apertura-cierre (en cuyo caso son reemplazadas), existe aún una tasa de fallas para el periodo de operación en los que la cantidad de ciclos está por debajo del mencionado como límite de reemplazo. Dicha tasa de fallas para cada válvula se estima en $1{,}123 \times 10^{-3}$ f/h (para el modo de falla cuya distribución es del tipo exponencial hasta el límite de sustitución por ciclos). ¿Cuál será la confiabilidad del sistema a las 500 horas de funcionamiento para esta situación?

Siendo que la tasa de fallas para las tres válvulas es la misma, entonces:

$$C_{(500)s} = 1 - (1 - e^{-(0{,}001123 \times 500)})^3 = \mathbf{92{,}07\%}$$

¿Cuál será la confiabilidad del sistema para el mismo tiempo salvo que ahora sólo hay dos válvulas instaladas funcionando simultáneamente?

$$C_{(500)s} = 1 - (1 - e^{-(0{,}001123 \times 500)})^2 = \mathbf{81{,}54\%}$$

En ambos casos se obtiene un bajo nivel de confiabilidad a pesar de contar con 3 y 2 válvulas en paralelo respectivamente, debido a la alta tasa de fallas que cada una de las válvulas posee. De todas formas, la confiabilidad en paralelo será mayor que la mayor confiabilidad de sus partes.

4) Un grupo de componentes redundantes y pasivos (Variable Aleatoria Discreta).

En arreglos con un número de *n* equipos en paralelo listos para operar, el desempeño del conjunto es conveniente representarlo por medio de la ley de distribución Binomial. Se evalúa cuál es la probabilidad de que fallen x equipos de un total de *n* con posibilidad de hacerlo satisfactoriamente.

Ejemplo 1.2.11

El tren trasero de una aeronave está constituido por dos grupos de ruedas lado a lado, cada uno de los cuales contiene 3 neumáticos (6 ruedas traseras en total). Es posible lograr un aterrizaje exitoso si al menos dos neumáticos de cada uno de los juegos de 3 ruedas se encuentran operativos al momento de tocar pista. Calcular la Confiabilidad para un aterrizaje seguro, siendo la tasa de fallas estimada para cada neumático de 1 en 500 ó $\lambda = 0{,}002$. Cabe aclarar que con una sola rueda en cualquiera de los dos grupos no hay garantías de un buen aterrizaje.

Bajo estas condiciones se tiene que para cada grupo de ruedas $x = 1$ en la ecuación 1.2.28.

$$C_{(1 \text{ en } 3)} = 1 - \left[\binom{3}{2} \lambda^2 (1 - \lambda)^1 + \binom{3}{3} \lambda^3 (1 - \lambda)^0\right]$$

$$C_{(1 \text{ en } 3)} = 1 - [(3) \times (0{,}002)^2 \times (1 - 0{,}002)^1 + (1) \times (0{,}002)^3 \times (1 - 0{,}002)^0]$$

$$C_{(1 \text{ en } 3)} = 1 - [(3) \times (0{,}002)^2 \times (1\text{-}0{,}002) + (0{,}002)^3]$$

$$C_{(1 \text{ en } 3)} = \mathbf{99{,}9988\%}$$

Pero si el avión requiere de los dos juegos de ruedas para aterrizar con éxito, entonces éstos deben considerarse en serie:

$$C_{\text{Tren trasero}} = C_{\text{Grupo 1}} \cdot C_{\text{Grupo 2}} = 0{,}999988^{\,2}$$

$$C_{\text{tren}} = \mathbf{99{,}9976\%}$$

Ejemplo 1.2.12

Un sistema automático de extinción de incendios posee una arquitectura con 3 válvulas solenoides en paralelo ($n = 3$) para permitir el paso de agua desde el colector general a uno de los anillos de distribución. Estas válvulas constituyen un sistema de seguridad que ante la necesidad de combatir un siniestro deberán, en conjunto, permitir el paso de agua. El sistema está diseñado para que ante una necesidad abran las 3 válvulas simultáneamente. La probabilidad de falla (tasa de fallas) de cada una de las válvulas es 1 en 50 ó $\lambda = 0{,}02$ para cualquier instante dado. Se considera como único modo de falla posible: *"la válvula se traba en la posición cerrada"*. Es decir que la probabilidad de que cada válvula se encuentre trabada cuando fuese necesaria su apertura, es 1 en 50. Calcular la confiabilidad para que en cualquier instante dado el sistema permita el paso de agua desde el colector al anillo, bajo tres condiciones:

1) El sistema puede actuar satisfactoriamente con solamente una de las válvulas abiertas.
2) El sistema funciona si dos de las tres válvulas acciona correctamente.
3) El sistema requiere que todas las válvulas estén operativas para funcionar.

1) Si puede funcionar sólo con una de las tres válvulas, entonces $x = 2$ en la ecuación 1.2.28.

$$C_{(2 \text{ en } 3)} = 1 - \left[\binom{3}{3} \lambda^3 (1 - \lambda)^0\right]$$

$$C_{(2 \text{ en } 3)} = 1 - [(1) \times (0{,}02)^3 \times (1 - 0{,}02)^0]$$

$$C_{(2 \text{ en } 3)} = 1 - [(1) \times (0{,}02)^3 \times 1]$$

$$C_{(2 \text{ en } 3)} = \mathbf{99{,}9992\%}$$

2) Si el sistema debe contar al menos con dos de las tres válvulas, $x = 1$ y:

$$C_{(1\text{ en }3)} = 1 - \left[\binom{3}{2} \lambda^2 (1-\lambda)^1 + \binom{3}{3} \lambda^3 (1-\lambda)^0\right]$$

$$C_{(1\text{ en }3)} = 1 - [(3) \times (0{,}02)^2 \times (1 - 0{,}02)^1 + (1) \times (0{,}02)^3 \times (1 - 0{,}02)^0]$$

$$C_{(1\text{ en }3)} = 1 - [(3) \times (0{,}02)^2 \times (1\text{-}0{,}02) + (0{,}02)^3]$$

$$C_{(1\text{ en }3)} = \mathbf{99{,}8816\%}$$

3) Si el sistema requiere de las tres válvulas, entonces $x = 0$

$$C_{(0\text{ en }3)} = 1 - \left[\binom{3}{1} \lambda^1 (1-\lambda)^2 + \binom{3}{2} \lambda^2 (1-\lambda)^1 + \binom{3}{3} \lambda^3 (1-\lambda)^0\right]$$

$$C_{(0\text{ en }3)} = 1 - [(3) \times (0{,}02)^1 \times (1 - 0{,}02)^2 + (3) \times (0{,}02)^2 \times (1 - 0{,}02)^1 + (1) \times (0{,}02)^3 \times (1\text{-}0{,}02)^0]$$

$$C_{(0\text{ en }3)} = 1 - [(3) \times (0{,}02) \times (1 - 0{,}02)^2 + (3) \times (0{,}02)^2 \times (1 - 0{,}02) + (0{,}02)^3]$$

$$C(_{0\text{ en }3)} = \mathbf{94{,}12\%}$$

5) Un grupo de componentes en stand-by (Variable Aleatoria Discreta)

Estos sistemas presentan componentes redundantes en forma pasiva; de tal forma que ante la falla del elemento activo, algún otro es capaz de asumir el control y desarrollar por igual las funciones requeridas. La figura 1.2.17 muestra un diagrama característico de elementos en stand-by donde habiendo *n* elementos, *n-1* es la cantidad en stand-by. Para que el sistema quede fuera de servicio deberán fallar *n* elementos.

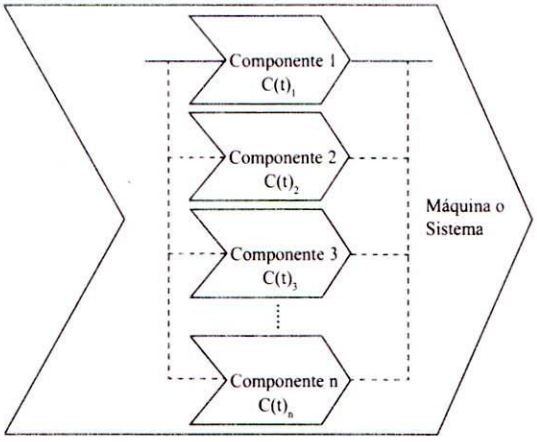


Figura 1.2.17
Sistema redundante pasivo.

Asumiendo para todos los componentes igual distribución exponencial (λ = cte), la probabilidad de que el conjunto opere sin fallas durante cierto periodo, se regirá por la distribución de Poisson (1.2.30) para variables discretas:

$$P(n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$

Y su confiabilidad, de acuerdo a la ecuación 1.2.31:

$$C(t)_s = e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^2 e^{-\lambda t}}{2} + \frac{(\lambda t)^3 e^{-\lambda t}}{6}$$

$$C(t)_s = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{[(\lambda t)^i e^{(-\lambda t)}]}{i!}$$

Ejemplo 1.2.13

El mismo sistema hidráulico considerado en el ejemplo 1.2.10, pero asumiendo que dos de las válvulas están en reserva en caso que la primera de ellas falle, accionado a través de un sistema automático de conmutación. Asumiendo que la tasa de fallas stand-by de las válvulas en reserva sigue siendo la misma, es decir 1,123 x 10^{-3} f/h, ¿cuál será la confiabilidad del sistema a las 500 horas de funcionamiento, tanto para dos válvulas en stand-by como para una?

(Para 2 válvulas en reserva)

$C_{(500)s} = e^{-(0,001123 \times 500)} + 1,123.10^{-3} \times 500 \times e^{-(0,001123 \times 500)} + [(1,123.10^{-3} \times 500)^2 \times e^{-(0,001123 \times 500)}] / 2$

$C_{(500)s} = 0,570352892542 + (0,5615 \times 0,570352892542) + (0,3152822 \times 0,570352892542) / 2$

$C_{(500)s} = \mathbf{98,05\%}$

(Para 1 válvulas en reserva)

$C_{(500)s} = e^{-(0,001123 \times 500)} + 1,123x10^{-3} \times 500 \times e^{-(0,001123 \times 500)}$

$C_{(500)s} = 0,5703528925420 + (0,5615 \times 0,5703528925420)$

$C_{(500)s} = \mathbf{89,06\%}$

Se obtiene un nivel de confiabilidad más bajo de lo esperado aún teniendo 1 y hasta 2 elementos redundantes pasivos e iguales; esto se debe a que la tasa de fallas todavía tiene un valor alto para cada válvula. Valores inferiores a 1 x 10^{-4} f/h dan confiabilidades superiores al 99%.

Nótese la diferencia entre los dos valores de confiabilidad para los casos con 2 redundancias activas del ejemplo 1.2.10 (C = **92,07%**) y con 2 pasivas de este último ejemplo (C = **98,05%**); siendo todos los parámetros equivalentes.

En la figura 1.2.18 se grafica el comportamiento de la confiabilidad para los sistemas redundante activo y stand-by de los ejemplos mencionados con anterioridad; se incluye además, la confiabilidad individual para una sola válvula (Simple).

Obsérvese que la confiabilidad de un arreglo paralelo no se comporta de forma exponencial como sí lo hacen cada uno de sus ítems; la tasa de fallas varía en función del tiempo y se asemeja más al comportamiento normal.

A las 500 horas de operación la confiabilidad de una válvula no supera el 60%, para una configuración en paralelo con dos válvulas activas poco más de un 80%, y con una de las válvulas en stand-by casi se alcanza el 90%.

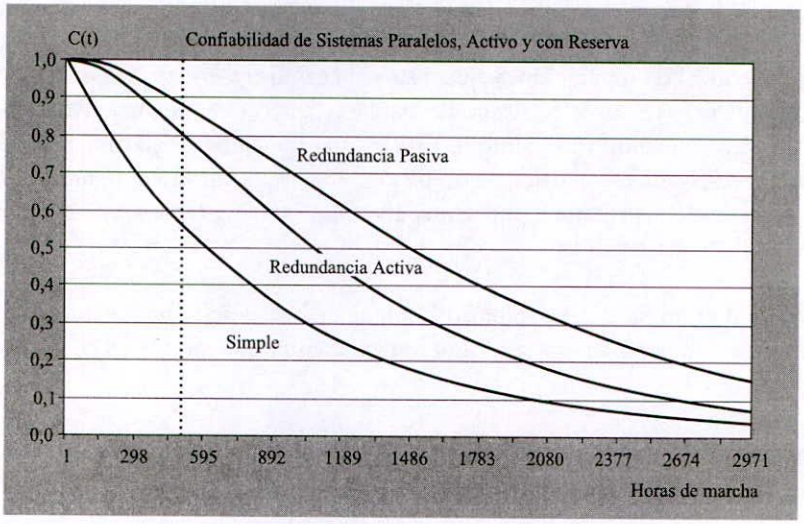


Figura 1.2.18 Confiabilidad para sistema simple, redundancia activa y redundancia pasiva (stand-by).

En la práctica, la cuestión no es tan simple. Algunos componentes tienen más de un modo de falla, lo que hace disminuir la seguridad del conjunto. Esto obliga a realizar análisis de probabilidad de falla más profundos.

Dispositivos Redundantes y de Protección

Las funciones de seguridad o de protección se instalan con el fin de eliminar o minimizar los perjuicios de una avería, detener totalmente las funciones del equipo protegido o minimizar los impactos de los fallos.

Esta es la situación de la mayoría de los **Dispositivos Redundantes** y los **Dispositivos de Protección**, como sistemas de alarmas, equipos en stand-by (redundantes), cortes de emergencia, disyuntores, etc.

Hemos visto las posibles configuraciones de un conjunto de *n* elementos y la confiabilidad según sea el caso. La frecuencia de inspección de algunas tareas de mantenimiento está directamente relacionada con el nivel de confiabilidad esperado para todo el sistema. Para los equipos redundantes o de protección importa la disponibilidad, medida como el espacio de tiempo en que la función de protección se encuentra en condiciones de funcionar apropiadamente cuando es requerida. En este caso, la disponibilidad se expresa como una probabilidad. *(Ver Mantenimiento Detectivo).*

Por ello sólo mencionamos a continuación cómo están constituidos los dos grupos posibles de dispositivos.

Un dispositivo redundante puede ser **pasivo** o **activo**. Los primeros se encuentran en reposo o sin carga mientras cumplen la función de espera. Si el elemento o la función a resguardar sufren una detención, entonces el elemento de protección lo reemplaza. Un caso de dispositivo redundante pasivo, lo constituye un grupo electrógeno instalado para suplir el corte de energía eléctrica de una instalación.

Las redundancias activas se encuentran en funcionamiento y actúan como sistemas duplicados, aumentando la disponibilidad del conjunto dado que cualquiera de las partes (hasta un cierto punto) es capaz de satisfacer por completo las necesidades ante la indisponibilidad de la otra. Un sistema de este tipo lo podemos encontrar en el doble encendido de los motores aeronáuticos de combustión interna.

Por último tenemos los **Dispositivos de Protección**, constituidos por sistemas con capacidad para **interrumpir** el funcionamiento de otro sistema en estado de falla, **contener** una situación de peligro, o **indicar** a través de una alarma el mal funcionamiento o desvío de alguna variable de funcionamiento.

1.2.10 Mantenibilidad

La mantenibilidad es una característica interesante en aquellos equipos que se reparan cuando fallan, y cuyo tiempo de reparación es significativo. El tiempo en que un ítem es puesto nuevamente en funcionamiento, según los estándares de servicio establecidos, es la variable aleatoria.

Este tiempo depende del nivel de dificultad técnica que tiene el sistema para llevar adelante las tareas de **diagnóstico**, y la capacidad para efectuar la **reparación**. Son muchos los factores que afectan el tiempo de diagnóstico y el de reparación, y que a su vez se definen en las primeras etapas del ciclo de vida (diseño). Durante el anteproyecto, diseño de detalle o fabricación de un activo, es necesario tomar decisiones que afectarán su comportamiento futuro, como es justamente su capacidad de ser mantenido. Aquí se hace imprescindible la participación de personal especialista en mantenimiento. Pensando en el mantenimiento desde el principio, podremos disminuir considerablemente el costo total del ciclo de vida y maximizar la mantenibilidad.

*La **mantenibilidad** es un parámetro estadístico que se define como la probabilidad que tiene un ítem en estado de falla de ser diagnosticado y reparado con éxito en un tiempo t, y en el contexto de operación establecido.*

Ser mantenido incluye la capacidad que posee para que se le diagnostique el fallo, pero también las posibilidades que tiene de ser reparado en el menor tiempo posible de acuerdo a su complejidad.

La mantenibilidad no es una propiedad que debamos tener en cuenta sólo para la ejecución de reparaciones provocadas por averías imprevistas *(Mantenimiento Correctivo*[1]*)*, sino también para programar aquellas rutinas definidas en el Plan de Mantenimiento optimizando el tiempo que éstas son capaces de insumir. *(Ver Mantenimiento Preventivo).*

Algunos factores que afectan la mantenibilidad son, la accesibilidad, localización, peso, forma, capacidad técnicas de los reparadores, capacidad de gestión de los programadores, etc.

En la figura 1.2.19 un resumen de los factores internos y externos que influyen en la mantenibilidad.

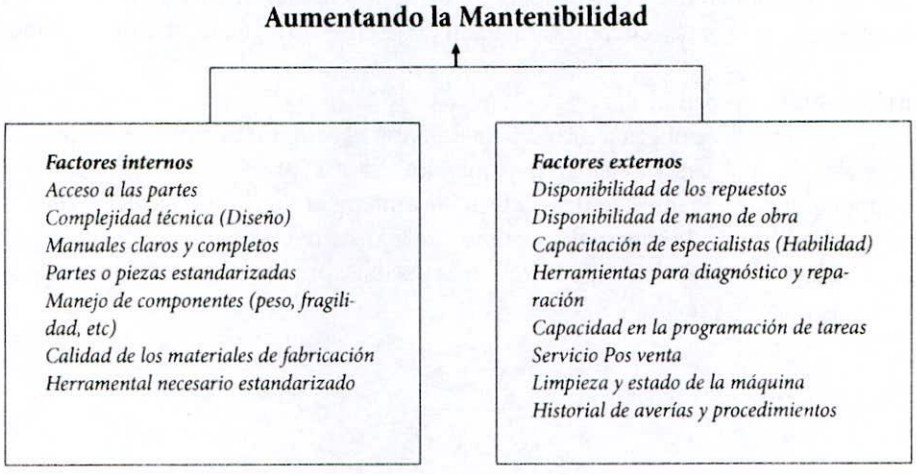


Figura 1.2.19
Factores internos y externos para el aumento de Mantenibilidad.

A mayor complejidad técnica mayor será el tiempo de diagnóstico y menor el de reparación. Suele suceder esto en la electrónica, donde generalmente se insume mayor tiempo para diagnosticar el fallo que para repararlo. La efectividad del sistema de mantenimiento jugará un papel muy importante para el grado de mantenibilidad. Dentro del tiempo para realizar las tareas de reparación se debe considerar también el grado de dificultad en disponer de las piezas de recambio. La política de gestión de repuestos cobra un rol preponderante en el índice de mantenibilidad.

Con la aplicación del pilar "Gestión Temprana" de la metodología TPM[2] es mucho lo que se puede mejorar en los preliminares del Ciclo de Vida de los activos.

Una filosofía de diseño muy utilizada en la actualidad, y que colabora ampliamente con la mantenibilidad y con la disponibilidad, es fabricar las piezas con encastres, conectores, soportes, bridas, etc. que permitan una única manera de colocación. Esto garantiza que las piezas se instalen de la forma correcta, mejorando así la curva de arranque del equipo y evitando los conocidos **"fallos de puesta en marcha"**.

Siendo que es amplia la cantidad de factores que influyen en la mantenibilidad y que muchos de ellos están relacionados entre sí, se debe utilizar un parámetro estadístico para estimarla.

Si la Condición Básica del equipo es el parámetro a alcanzar, se pretende determinar el tiempo t para alcanzar dicho estado.

La **mantenibilidad inherente** forma parte de la mantenibilidad, y se define como aquella que posee el equipo desde el punto de vista del diseño. Es decir, la que mide con qué facilidad el equipo ha sido pensado para su reparación.

Como los fallos son aleatorios, y el tiempo de reparación para cada componente es diferente, los tiempos para repararlo también serán aleatorios.

---

1 Por ejemplo, la norma MIL-2173 (AS) refiere que el Mantenimiento Correctivo es el conjunto de acciones realizadas como resultado de un fallo, para restablecer un ítem a una condición especificada.
2 Ver apartado 7.4.4.4, Capítulo 7.

Las leyes de distribución de densidad más utilizadas para estudiar la mantenibilidad son:

- **Normal:** Cuando el tiempo total de reparación es ocupado mayormente para tareas de desarme - armado.
- **Exponencial:** Para aquellas situaciones en que el diagnóstico y el tiempo medio de reparación (MTTR) son bajos.
- **Lognormal:** Se utiliza para aquellos casos en que el tiempo total de reparación está constituido por varios tiempos diferentes, diagnóstico, desarme y armado, disponibilidad de los repuestos y herramientas, etc., y, además, cuando la relación entre ellos no sigue un patrón definido.

Ley de distribución Log-normal

La distribución Lognormal se utiliza también para describir el comportamiento de los ciclos de falla en la fatiga de materiales y en el diseño de elementos sometidos a cargas variables. En el modelo de distribución normal, se supone que los eventos se distribuyen "normalmente" en función de la variable aleatoria, mientras que para el modelo **lognormal** se asume que la distribución es "normal" pero en función del **logaritmo del tiempo.** Esta ley de distribución no es posible aproximarla por la ley de Weibull. Su función de densidad se expresa mediante:

$$f(t) = \frac{1}{t\,\sigma_{\ln(t)}\sqrt{2\pi}}\; e^{-[\ln(t) - \mu_{\ln(t)}] / 2\,\sigma_{\ln(t)}^{2}} \qquad (1.2.35)$$

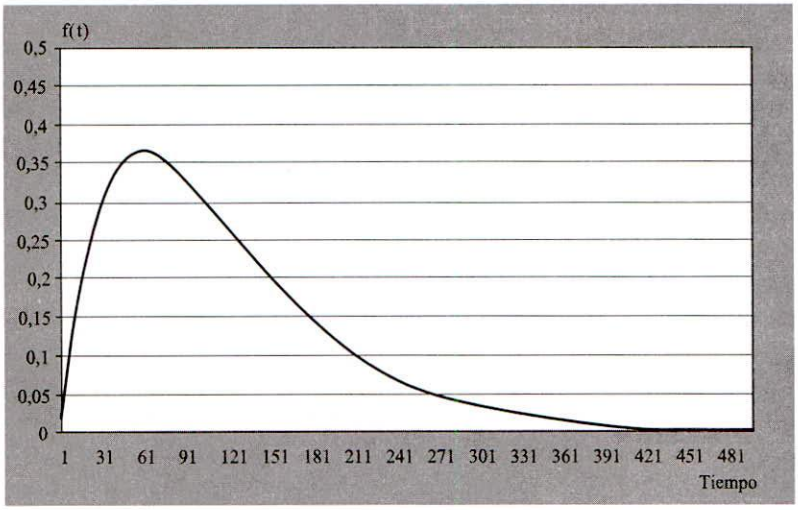


Figura 1.2.20 Función de densidad Lognormal.

Siendo μ la media aritmética del logaritmo de la tasa de fallas y σ la desviación estándar del logaritmo de la tasa de fallas. En la distribución lognormal tampoco pueden obtenerse resultados en forma cerrada, sino por medio del uso de tablas o cálculo numérico.

En su forma más general, e independientemente de la función de distribución adoptada, la mantenibilidad se define por:

$$M(t) = 1 - e^{-\int_{0}^{t} \varepsilon(t)\; d(t)} \qquad (1.2.36)$$

La ecuación (1.2.9) asume que la *"tasa de reparación o tasa de mantenibilidad"* ε es constante e independiente de la variable aleatoria *t*. Es decir, ε(t) = 1/MTTR para cualquier instante *t*.

Cuantos más datos estadísticos se tengan para un mismo equipo, mayor será la aproximación que se pueda esperar para la *"tasa de reparación"* ε.

$$M(t) = 1 - e^{-(\varepsilon t)} = 1 - e^{-(t/MTTR)} \qquad (1.2.37)$$

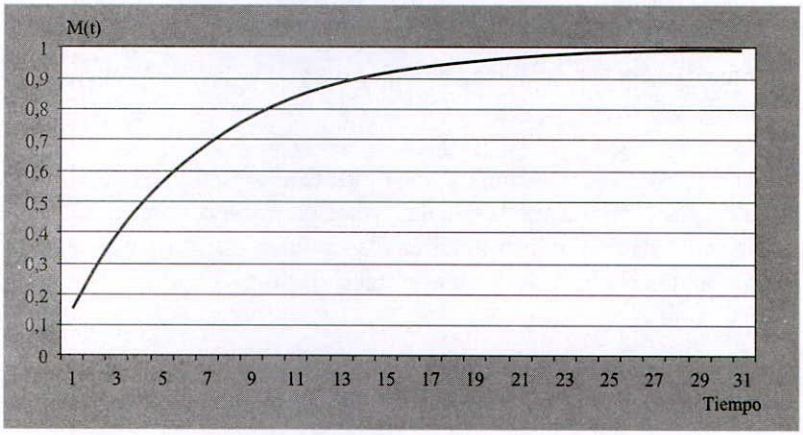


Figura 1.2.21 Función de Mantenibilidad.

En rigor, un equipo está constituido por *n* componentes, y cada uno de ellos tendrá asociada una tasa de fallas λ_i y un tiempo medio para reparación t_{ri}. Por otra parte, cada componente podrá tener asociado más de un modo de falla.

Siendo *n* la cantidad de componentes, es posible calcular el MTTR de un equipo completo según:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i \lambda_i t_{ri}}{\sum_{i=1}^{n} n_i \lambda_i} \qquad (1.2.38)$$

De esta forma, se puede calcular el tiempo medio para reparación de un equipo completo si se conoce la tasa de fallas y el tiempo medio de reparación de cada uno de sus elementos.

Tanto para las etapas de diseño como para aquellos equipos de los que no se cuenta con suficiente historial de fallos, es recomendable el estudio de la mantenibilidad por medio de la confección de tablas de seguimiento. Es útil la experiencia acumulada sobre componentes similares, pues aún actuando en sistemas o contextos diferentes, constituyen una buena manera de optimizar los tiempos medios de reparación (MTTR).

En la figura 1.2.22[1] se presenta una tabla típica para el estudio de la mantenibilidad en un sistema de transporte utilizando la ecuación (1.2.38).

Equipo Transportador											
Elemento bajo falla	Tasa de Falla (λ)	Cantidad de elementos (i)	n . λ	**Tiempo medio para reparación (MTTR) en horas**						t_{ri}	n. λ . t_{ri}
				Apreciación	Diagnóstico	Acceso	Reemplazo	Ajuste	Verificación		
Rodamientos	0.000114155	6	6.85E-04	0.05	0.33	0.2	0.75	0.16	0.08	1.570	1.08E-03
Soportes	0.000038052	6	2.28E-04	0.05	0.33	0.25	0.75	0.16	0.08	1.620	3.70E-04
Rodillos	0.000057078	3	1.71E-04	0.05	0.25	0.15	1	0.5	0.08	2.030	3.48E-04
Cinta	0.000228311	1	2.28E-04	0.05	0.12	0.15	1.5	0.5	0.08	2.400	5.48E-04
Reductor	0.000045662	1	4.57E-05	0.05	0.42	0.2	1	0.25	0.08	2.000	9.13E-05
Motor	0.000028539	1	2.85E-05	0.05	0.25	0.2	0.75	0.25	0.08	1.580	4.51E-05
			1.39E-03								**2.48E-03**
MTTR 1.79 horas											

Figura 1.2.22 Tabla de Mantenibilidad.

La apertura mostrada para los tiempos medios de reparación de cada elemento bajo falla, no necesariamente debe ser la indicada. Se podrán tipificar los tiempos parciales de la reparación (diagnóstico, acceso, etc) de acuerdo a las posibilidades con que se cuente de estimar cada uno de ellos. Cuanto mayor sea la apertura, más fácilmente se podrá mejorar el proceso.

---

1 Ejemplo basado en la tabla propuesta en "Introducción al Proyecto de Ingeniería de Enrique V. García y Miguel J. G. Hernández, página 176.

En el punto 1.2.9 de este capítulo se analizó la Confiabilidad de Sistemas. Las expresiones vistas en ese punto son válidas *cuando no se tiene en cuenta la mantenibilidad.* Un sistema con mantenibilidad es aquel cuyos equipos se reparan al fallar.

Si los equipos protegidos se reparan cuando fallan (es lo que ocurre en la realidad), el sistema **protegido -protección** tendrá índices de confiabilidad más altos para un mismo tiempo t y menor será la probabilidad de falla simultánea para dicho período.

Veamos el caso de un conjunto de dos equipos, uno funcionando y el otro en stand-by. En ambos casos se considera que tanto la tasa de fallas λ como la tasa de reparación ε, son constantes. Otras dos suposiciones son que el proceso de conmutación no introducirá fallas ni interrupciones y que, además, el equipo de reserva nunca fallará por el hecho de encontrarse en tal situación.

Posibles estados

1) 1 equipo operando y 1 equipo en stand-by(operativo)
2) 1 equipo operando y 1 equipo en reparación (fallado)
3) 2 equipos en reparación (falla simultánea)

En rigor, la confiabilidad estará dada por la probabilidad de que el sistema se encuentre en los estados 1 ó 2. Pero nunca en 3.

Se demuestra que la confiabilidad para un sistema compuesto por dos equipos, uno de los cuales se encuentra en reserva y considerando que se realiza la reparación del equipo protegido ante la falla, se expresa mediante:

$$C(t)_s = e^{-\left(\frac{\lambda^2}{\mu}\right)^t} \qquad (1.2.39)$$

Si retomamos el ejemplo mostrado en la figura 1.2.18, y calculamos la confiabilidad del sistema bajo estas nuevas condiciones con una tasa de reparación ε de 1/70, se tendrá:

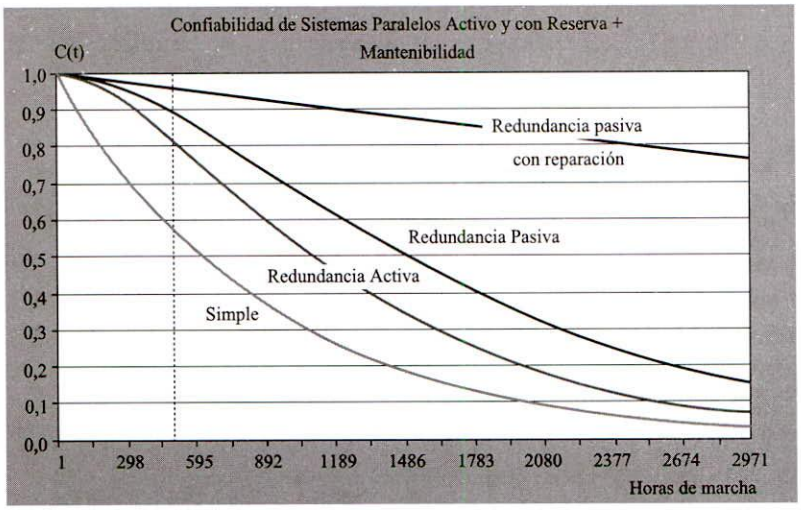


Figura 1.2.23 Aumento de Confiabilidad con la incorporación de la reparación.

Se puede apreciar el incremento en la confiabilidad si se introduce la mantenibilidad. Ahora bien, para valores cercanos a las 500 horas de funcionamiento la confiabilidad del sistema de dos válvulas es superior al 95%.

1.2.11 Disponibilidad Operacional

Se define Disponibilidad Operacional de un equipo, conjunto de equipos o línea de producción, al porcentaje del tiempo en que estuvo disponible para el proceso de operación en las condiciones de seguridad y calidad establecidas.

La Disponibilidad Operacional queda definida por:

$$D_o = \frac{(T_o - T_{np})}{T_o} \times 100 \qquad (1.2.40)$$

Donde T_O es el tiempo disponible para Operar y T_{np} el tiempo de paradas no programadas. T_O no tiene en cuanta el tiempo programado para mantenimiento o cualquier otro aspecto productivo como cambios de marca, calibre, producto, etc.

Para aquellos equipos que se reparan luego de la detención, y considerando un tiempo suficientemente grande en comparación con el resto de las variables, suelen utilizarse también las expresiones:

$$D_o = \frac{\varepsilon}{\lambda + \varepsilon} \qquad (1.2.41)$$

$$D_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \qquad (1.2.42)$$

Ejemplo 1.2.14

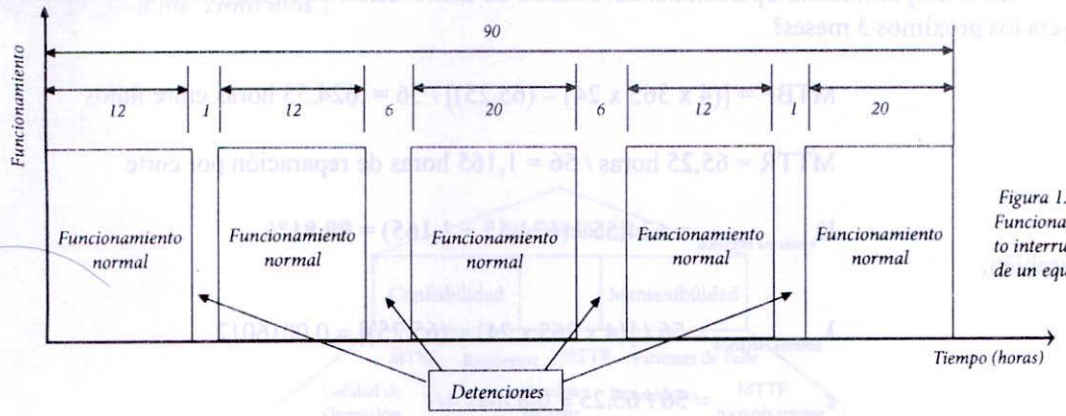


Figura 1.2.24 Funcionamiento interrumpido de un equipo.

Supongamos que un equipo tuvo un desempeño de funcionamiento como se ve en la figura 1.2.24. A lo largo de 90 horas de funcionamiento sufrió 4 detenciones que involucraron un tiempo total por paradas no programadas de 14 horas. El tiempo de funcionamiento neto resultó 76 horas.

La disponibilidad operacional será entonces:

$$D_O = [(90 - 14) / 90] \times 100 = 84{,}44\ \%$$

Siendo que se trata de un sistema que se repara cuando falla, el MTBF será:

$$MTBF = [(90 - 14) / 4] = 19 \text{ horas}$$

$$MTTR = 14 / 4 = 3{,}5 \text{ horas}$$

$$D_O = [MTBF / (MTBF + MTTR)] = [19 / (19 + 3{,}5)] = 84{,}44\ \%$$

1.3 Patrones de Falla

Los componentes de las máquinas pueden tener diferentes patrones de falla. Un **patrón de falla**, también conocido como **desempeño en el tiempo**, identifica la chance que tiene el mismo de sufrir averías a lo largo de toda su vida. El patrón de fallas de un sistema completo es el resultado de la acción simultánea de los patrones de falla de los diferentes modos de falla que le pueden ocurrir a cada una de sus piezas. Sobre un mismo elemento pueden influir uno o más modos de falla, es decir, más de una causa.

Pero si sobre el elemento prevalece un modo de falla por sobre los demás, estaremos en presencia de lo que se denomina **modo de falla dominante** *(Ver Tipos de Modos de Falla)*. Un modo de falla dominante es el responsable de la mayoría de las averías. Si, además, este modo de falla ocurre aproximadamente al cabo del mismo período de tiempo en una gran cantidad de piezas iguales, se dice que la dispersión de los tiempos de falla es baja. Si la dispersión es baja, todos los componentes "viven" aproximadamente el mismo tiempo.

Existen muchos elementos que responden a esta característica porque se encuentran sometidos a agentes de desgaste, degradación, envejecimiento, corrosión, ataque químico, etc. Pertenece a este grupo, por ejemplo, una tolva de carga para un determinado mineral. Estas partes fallarán casi exclusivamente por una sola causa raíz, referida al desgaste o agotamiento natural en tiempos parecidos. Si, además, el resto de los modos de falla tienen un comportamiento aleatorio de una relativamente baja probabilidad de ocurrencia (baja tasa de fallas), existirá un intervalo durante el cual la tasa de fallas integral del elemento será baja y constante. A este intervalo se lo denomina **vida útil** (VU). Durante la vida útil los fallos son aleatorios (β=1 en la distribución de Weibull).

Cuando se definió el período promedio entre fallas (MTBF), se subrayó la necesidad de no confundirlo con la **vida útil** (VU). Solamente podremos hablar de vida útil cuando la dispersión entre los $MTBF_i$ calculados, sea baja.

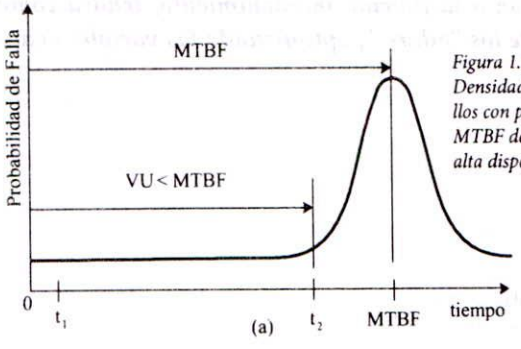
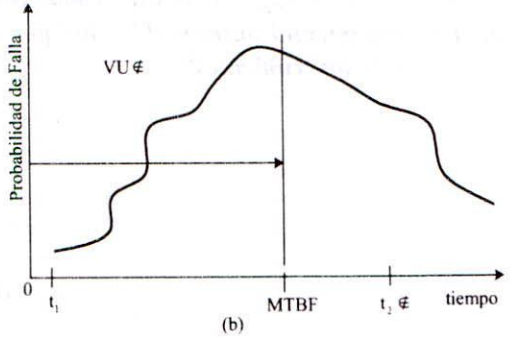


Figura 1.3.1 Densidad de Fallos con períodos MTBF de baja y alta dispersión.



Se define como ***vida útil*** *(VU) de un componente al intervalo de tiempo desde su puesta en marcha hasta el momento a partir del cual (para la mayoría de esos componentes) aumenta significativamente la tasa de fallas (λ).*

Dada una cantidad *i* de eventos de falla sobre un mismo elemento, el concepto de vida útil se aplica para aquellos casos en que la función de densidad de falla f(t) es del tipo normal y, además, de baja dispersión (figura 1.3.1 a). El valor de la dispersión tolerada estará en función de las consecuencias del fallo. *(Ver Mantenimiento Preventivo).*

Asúmase por un instante que la figura 1.3.1 b corresponde a la función densidad de fallos de un elemento en funcionamiento durante un año. Supóngase, además, que el mismo ha tenido una determinada cantidad de fallos durante ese período tal que el MTBF fue de 6 meses. Se continuó con el monitoreo durante 2 años más, obteniéndose la misma densidad de fallos. De esta forma durante los 3 años el MTBF se mantuvo en 6 meses, es decir, se "estabilizó". ¿Podríamos por lo último asegurar que la vida útil (VU) es 6 meses?, queda claro que no.

Ejemplo 1.3.1

Los registros históricos de tiempo hasta la falla han arrojado para una misma pieza, y para el mismo modo de falla, los valores mostrados en la tabla 1.3.1. Si se tolera una dispersión de hasta el 20% respecto a la media, determinar un valor apropiado para la vida útil (VU).

Cantidad de Eventos para el mismo componente y modo de falla	Tiempo hasta la falla en días
1	160
2	185
4	190
8	195
15	200
9	205
4	210
2	215
1	217
1	221

Tabla 1.3.1
Tiempos hasta la falla para un mismo componente y modo de falla.

Se puede verificar que la **media** para este grupo de valores se encuentra alrededor de los 200 días. Sólo un valor (160) aparece fuera del 10% de la dispersión tolerada para valores menores a la media. Podemos aceptar que un valor apropiado para la vida útil sería 180 días. Si la tolerancia fuese más exigente se deberían tomar valores menores a los 160 días, de modo que todos los componentes nunca fallen antes de su reemplazo. Además, el **93,6%** de los fallos (44 en total) se encuentran dentro del entorno $[\mu\text{-}2\sigma; \mu\text{+}2\sigma] = [$**184** días; **216,1** días$]$, donde σ = 8,03 días.

Retomando el análisis original, y si los fallos del componente responden a una ley normal, la probabilidad de falla total del componente (incluyendo la correspondiente a la del modo de falla dominante), tendrá valores casi constantes y muy bajos para la vida útil. La tasa de fallas (λ) baja, representa la recta inferior de la curva de la "bañera" (Figura 1.3.2).

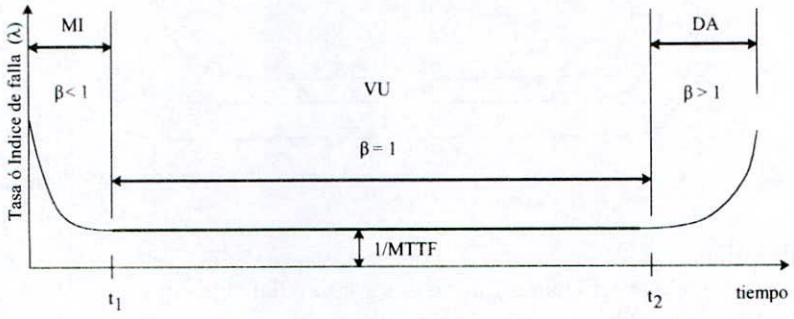


Figura 1.3.2
Período de Vida Útil consistente, curva de la bañera.

Durante VU es aplicable la ley exponencial para el cálculo de Confiabilidad. Transcurrida VU (también conocida como durabilidad), la tasa de fallas total del sistema comienza a aumentar en forma acelerada por todo lo comentado anteriormente, disminuyendo abruptamente la confiabilidad puntual a partir de t_2. En t_2 finaliza VU y comienza el intervalo DA de deterioro acelerado y agotamiento.

Los rodamientos responden casi exclusivamente a β=1; pero de existir un período de vida útil consistente (VU), éstos adoptan valores de entre $1,5 < \beta < 2,5$.

Así mismo, por defectos durante la fabricación, mal diseño o montaje, daños en el traslado, defecto en los materiales, exceso de mantenimiento o mantenimiento invasivo, etc. se pueden poner de manifiesto modos de falla **prematuros** que elevarán la tasa de fallas a niveles tales que ponen en peligro el desempeño futuro del componente, y cuya ley de variación es decreciente. A este período, que se extiende hasta t_1, se lo denomina intervalo de *mortalidad infantil* (MI).

Dado que la Confiabilidad es función de la tasa de fallas (λ), y que ésta a su vez varía de forma diferente según la etapa considerada (MI, VU ó DA), ocurrirá entonces que para un mismo elemento debamos utilizar leyes de distribución diferentes según sea la etapa de vida considerada. La pérdida de confiabilidad condicional ó tasa de fallas, es lo que se grafica en función del tiempo en la figura 1.3.3.

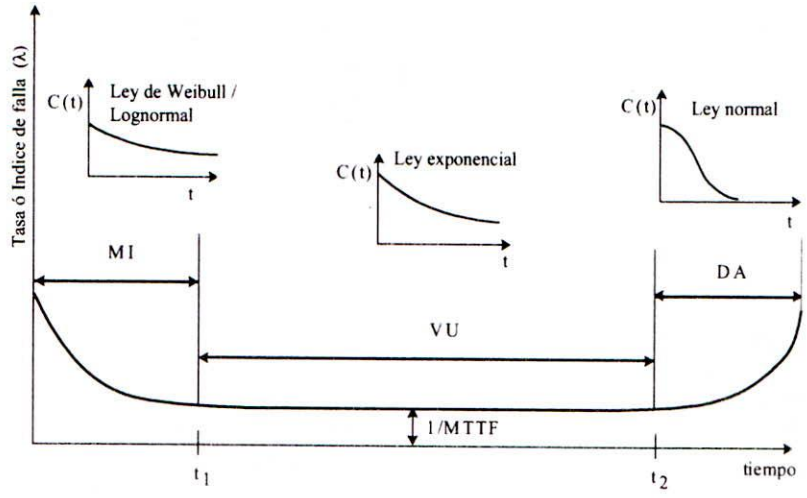


Figura 1.3.3
Tasa de fallas y función Confiabilidad según el período de vida.

Tanto la confiabilidad como la tasa de fallas estarán en función del nivel de "carga" o "contexto operativo". Vimos que si éste varía, lo más posible es que suceda lo mismo con el patrón de fallas.

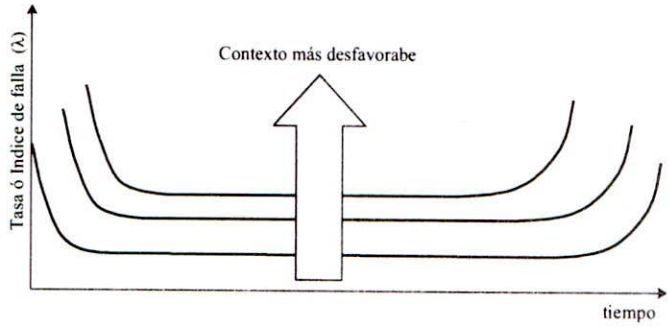


Figura 1.3.4
Aumento de la tasa de fallas cuando el contexto se hace más desfavorable.

Otros Patrones de Falla

Se pueden encontrar modelos particulares que se desprenden del anterior (curva de la bañera), donde los intervalos MI y DA son mucho menores o no existen.

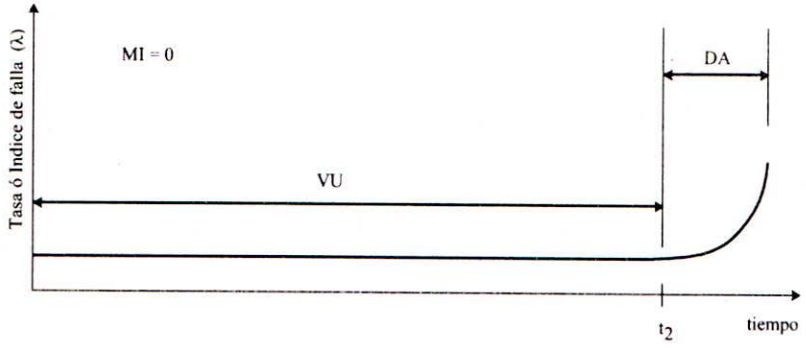


Figura 1.3.5
Período de vida útil sin mortalidad infantil.

Algunos elementos con certificaciones de calidad muy exigentes (factores internos), y que a su vez poseen una baja complejidad técnica para el montaje o puesta en marcha (factores externos), presentan muy baja mortalidad infantil (MI=0). La curva que los representa es la mostrada más arriba en la figura 1.3.5, donde en t_2 acaba su vida útil.

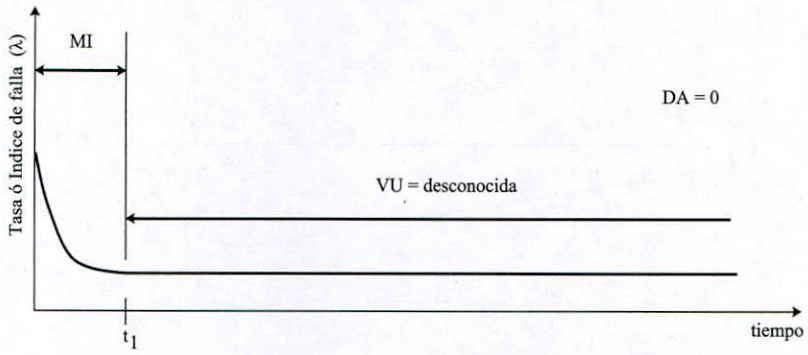


Figura 1.3.6
Sin período de vida útil consistente (DA = 0).

En otros casos no existe período de deterioro acelerado (DA=0); de esta forma, los fallos aleatorios continúan en el tiempo con el mismo índice de falla. Muchos componentes electrónicos responden a este patrón en los que una vez transcurrida satisfactoriamente la primer parte (hasta t_1), la posibilidad de que fallen se mantiene constante. Este tipo de componentes no tiene vida útil consistente; lo que no significa que nunca fallarán, sino que la posibilidad de ocurrencia es prácticamente siempre la misma. Esto hará necesario establecer una particular política de mantenimiento.

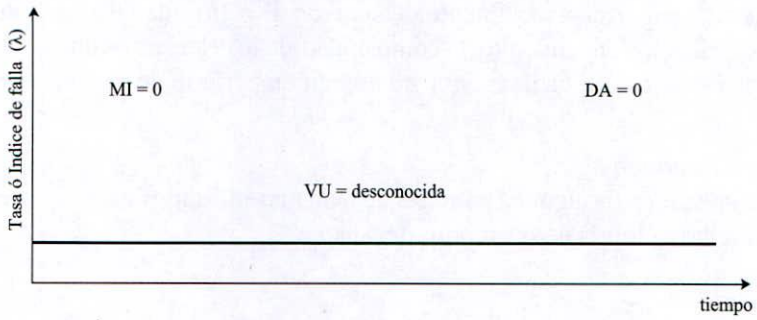


Figura 1.3.7
Sin período de vida útil consistente (DA = 0, MI = 0).

El patrón de fallas de la figura 1.3.7 es el resultado de la combinación de los dos anteriores, donde MI y DA son cero simultáneamente.

Existen otros casos particulares como los mostrados en las figuras 1.3.8 y 1.3.9, en los que la tasa de fallas, o bien aumenta progresivamente a lo largo de la vida del elemento (vinculado a algunos procesos de fatiga y descripta por la distribución de Weibull desviada), o bien disminuye. Para el caso de crecimiento lineal de la figura 1.3.8 durante VU, la pendiente es función del parámetro de escala α.

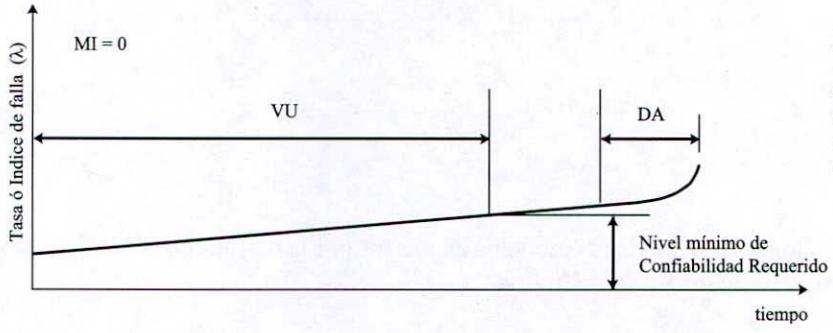


Figura 1.3.8
Período de vida útil sin mortalidad infantil, crecimiento lineal de la tasa de fallas.

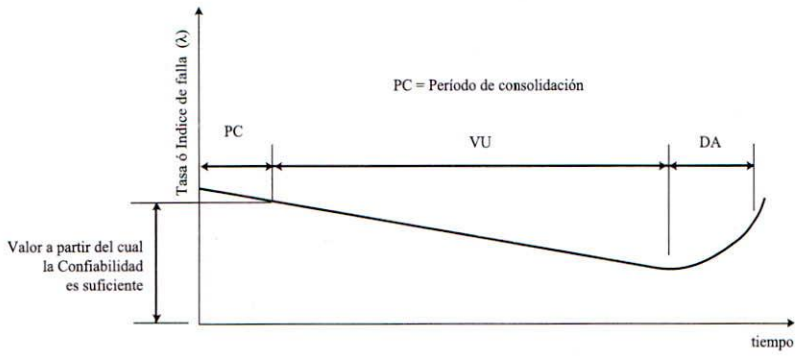


Figura 1.3.9
Período de vida útil sin mortalidad infantil, con tasa de fallas decreciente.

Estos tipos de comportamientos en función del tiempo (patrones de falla), son algunos de los casos más comunes. Las posibles combinaciones entre ellos, darán situación particulares que podrán validar el desempeño de cualquier elemento.

El patrón de fallas representado por la curva de la bañera, y la vida útil definida en ella, está íntimamente relacionado al Mantenimiento Preventivo. Lamentablemente en muchos ámbitos industriales se sigue pensando que siempre será mejor realizar algún tipo de mantenimiento preventivo de restauración o reemplazo cíclico ya que aún se cree que siempre existe una relación directa entre la edad de los componentes y la tasa de fallas.

Muchos estudios de confiabilidad han demostrado que en la actualidad son cada vez menos los componentes que se comportan exactamente de acuerdo al patrón de fallas establecido por la curva de la bañera. Estos modelos dependen de la complejidad de los elementos que constituyen el sistema; cuanto más complejos sean, más fácil será que no posean un período de vida útil consistente.

Patrones de falla – Resumen

A continuación un resumen de algunos patrones de falla más utilizados para representar el comportamiento de los elementos a través de sus modos de falla.

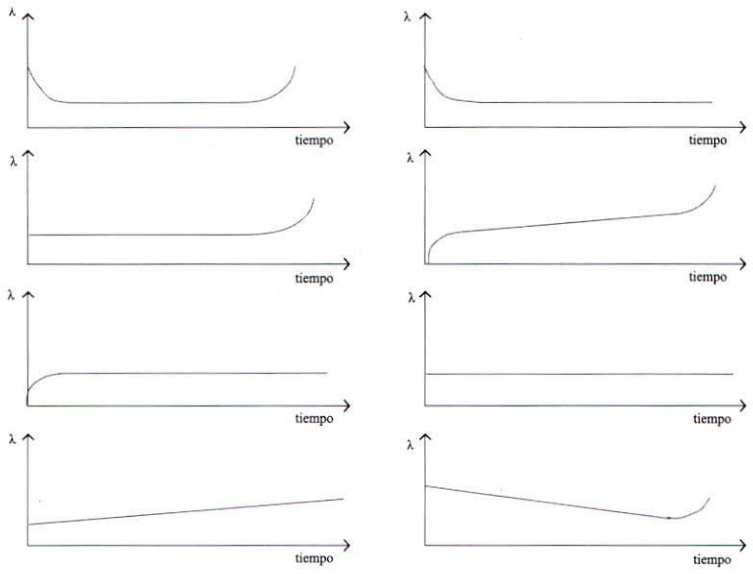


Figura 1.3.10
Patrones de fallas más representativos.

Muchos de ellos se derivan de los modelos expuestos por la metodología MSG-3[1] desarrollada por la aviación comercial de los Estados Unidos.

1 De sus siglas en ingles, Maintenance Steering Group.

1.4 Tipos de Mantenimiento. Introducción

Los nombres que suelen utilizarse para denominar los diferentes tipos de mantenimiento son muy variados. En esta parte se los describe sucintamente, para luego profundizarlos en los capítulos correspondientes. En algunas circunstancias resulta difícil establecer el límite entre cada uno dado que, a excepción del mantenimiento correctivo, la finalidad de todos es la misma, sólo que parten de perspectivas diferentes.

Es apropiado separarlos en dos grandes grupos. Por un lado encontramos las tareas que involucran acciones netamente **Reactivas**; por otro, aquellos que se caracterizan por acciones del tipo **Pro-activas**.

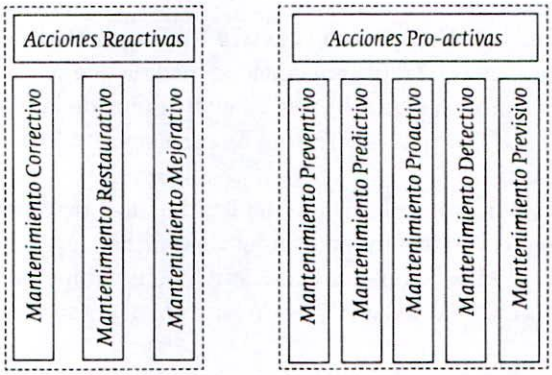


Figura 1.4.1
Acciones Reactivas y Pro-activas.

Acciones Reactivas

Una acción reactiva supone tomar alguna medida para restablecer las funciones originales que se perdieron como consecuencia de un evento inesperado (falla funcional imprevista). Si se trata de una **emergencia**, la programación casi no existe o, sencillamente, es improvisada.

También puede ocurrir que sea necesario tomar alguna medida **restaurativa** luego de detectar un desvío (falla incipiente) en los parámetros del equipo o proceso (como requerimiento de algún otro tipo de mantenimiento), en cuyo caso también reaccionamos ante el desvío detectado pero con algo más de tiempo para la programación.

Finalmente, en algunas oportunidades se hace imprescindible efectuar modificaciones, mejoras o rediseños, ya sea por razones de mantenibilidad, seguridad, proceso o capacidad (prestación deseada). En este caso las acciones reactivas tendrán aún más posibilidades de programarse. Las acciones reactivas no forman parte del Plan de Mantenimiento, sin embargo, son parte de la Planificación y Programación del área.

Acciones Pro-Activas

Los Planes de Mantenimiento están constituidos por acciones del tipo Pro-activas. Tienen como objetivo impedir que se manifiesten modos de falla, que no ocurran tan a menudo o minimizar sus consecuencias. Las áreas de mantenimiento manejan modos de falla tanto durante acciones Reactivas como Proactivas. Sin lugar a dudas, gestionar un evento (modo de falla) antes de que suceda, significa llevar adelante acciones Pro-activas.

Es importante destacar que la denominación que se le da a cada tipo de mantenimiento obedece a **dos aspectos** fundamentales.

1° Aspecto: "Por Clase de tarea"

El primer aspecto que define al tipo de mantenimiento corresponde exclusivamente a la clase de tarea. Cuando se dice que una rutina es predictiva involucra la utilización de cierta tecnología para identificar potenciales fallas; cuando hablamos de mantenimiento preventivo asumimos el reemplazo o la reparación cíclica de algún componente; cuando se persiguen los fallos ocultos en los sistemas de seguridad, las rutinas son detectivas.

2° Aspecto: "Por el criterio para establecer las frecuencias de intervención"
El segundo aspecto, y tal vez el más importante, es el que tiene en cuenta el criterio para establecer la frecuencia de ejecución de la operación. Los argumentos conceptuales son diferentes para cada tipo de mantenimiento a la hora de establecer el intervalo de tiempo (u otro contador) entre cada rutina, sea ésta preventiva, predictiva o detectiva.

La hipótesis asumida para determinar la frecuencia entre dos intervenciones **preventivas**, difiere totalmente del criterio para establecer cada cuánto tiempo es necesario llevar adelante un monitoreo de condición (mantenimiento **predictivo**), o bien una detección de fallos ocultos a través del mantenimiento **detectivo**. Los diferentes mecanismos de cálculo es lo que diferencia a cada una.

1.4.1 Mantenimiento Correctivo (Una Acción Reactiva No Programada)

Consiste en la reparación de averías o fallos funcionales a medida que se van produciendo. El personal encargado de identificar los defectos generalmente es el operador de la máquina, y es quien avisa al personal especializado para que realice la reparación. En otras oportunidades, el propio operador de la máquina repara alguna de las fallas.

Las acciones deliberadas y no controladas de Mantenimiento Correctivo fuerzan la necesidad de contar con excesivo personal de mantenimiento. Además, muchas reparaciones no siempre resultan definitivas y se transforman en fallos crónicos. Un excesivo Mantenimiento Correctivo tiende a incrementar el número de equipos en paralelo (stand-by) lo que provoca, a su vez, elevados niveles de capital inmovilizado.

Se dificulta la confección de presupuestos debido a la aleatoriedad de los eventos; todo lo cual incrementa los gastos de operación y mantenimiento.

Presenta como característica positiva que se necesita poco planeamiento; aunque en ciertas ocasiones las averías repentinas provocan un impacto desfavorable en la operación, deteniéndola y generando grandes pérdidas en cantidad y calidad.

Por lo general se debe proceder en forma acelerada aumentando el riesgo de accidentes.

1.4.2 Mantenimiento Restaurativo (Una Acción Reactiva Programada)

Como consecuencia de las rutinas de mantenimiento Pro-activas, puede detectarse que ciertos parámetros están fuera del estado óptimo de funcionamiento aún sin haberse producido todavía la falla funcional. Este estado insatisfactorio puede requerir la intervención de personal especializado para restaurar la funcionalidad del componente. Teniendo un adecuado sistema de programación, permite programar las tareas con cierta anticipación. También se lo conoce como **mantenimiento de restauración programada** (MRP).

1.4.3 Mantenimiento Mejorativo (Una Acción Reactiva Programada)

Este tipo de acciones reactivas programadas se dividen a su vez en dos grupos.

El primero corresponde a tareas realizadas exclusivamente por el personal de planta. Se conoce como **Rediseño** y busca optimizar el proceso productivo, eliminar fallos crónicos, o bien aumentar la confiabilidad o mantenibilidad de los activos modificándolos de alguna manera. Los rediseños pueden ser de índole **física** u **operativa**. Los primeros involucran modificaciones sobre el activo, mientras que los **Rediseños Operativos** pretenden mejorar los procedimientos de operación, los procedimientos de mantenimiento e inclusive el grado de capacitación de las personas.

El segundo grupo involucra a los fabricantes de nuevos productos no "probados" en el mercado o probados parcialmente y que, además, sus fallos tienen graves perjuicios en seguridad. Como acciones surgidas de los análisis de falla (ADF), encontramos el reemplazo masivo de componentes, el rediseño de algún sistema o subsistema o la modificación del Plan Original de Mantenimiento. Se lo denomina también **Mantenimiento Curativo**.

1.4.4 Mantenimiento Preventivo

Se pretende disminuir la frecuencia de las paradas no programadas aprovechando el momento más oportuno, tanto para Producción como para Mantenimiento. Permite, además, preparar herramientas, repuestos e insumos y seleccionar al personal más capacitado.

Como parte del mantenimiento preventivo se encuentran los servicios de inspección cíclicos, conservación y restauración de un ítem para prevenir, detectar o corregir defectos.

Se realiza a espacios de tiempo, horas, ciclos, etc. regulares bien definidos y sin importar el estado del ítem a mantener. Normalmente con el equipo o instalación fuera de servicio y sustituyendo o reparando cíclicamente los componentes. En algunos equipos es necesario justificar cierta rentabilidad económica para su aplicación.

1.4.5 Mantenimiento Predictivo

Propone que es posible detectar síntomas prematuros de desperfectos o desajustes, algún tiempo antes de que se produzca una detención no deseada. Se presume que ciertos componentes "avisan" antes de llegar a la falla operacional (funcional).

Si estamos "atentos" y los componentes realmente "avisan", entonces por medio de herramientas tecnológicas adecuadas, podremos monitorear la curva de su estado. Se busca determinar con anticipación la mayor cantidad de fallas potenciales[1].

A partir de la detección de la falla incipiente, es posible estimar el tiempo de vida hasta la falla operacional, y en consecuencia, contar con el tiempo suficiente para programar su reemplazo o reparación. Para equipos prioritarios, se realizan estimaciones por evaluación estadística, tratando de extrapolar el comportamiento de esas piezas y determinar la frecuencia exacta de inspección.

Normalmente se realiza con el equipo o instalación en servicio.

Algunas herramientas utilizadas por el mantenimiento predictivo son:

√ Análisis de vibraciones (permanentes o periódicas)
√ Termografía infrarroja.
√ Análisis de partículas de desgaste.
√ Análisis de amperaje.
√ Inspección por ultrasonido.
√ Emisión acústica.
√ Verificación de metales y aleaciones, etc.

1.4.6 Mantenimiento Proactivo

Dentro de las filosofías de mantenimiento encontramos al mantenimiento proactivo, que al igual que el predictivo, consiste en monitorear las propiedades de ciertos parámetros en los componentes antes de decidir una intervención. *(No confundir el "Mantenimiento Proactivo" con las "Acciones Pro-activas").* Sin embargo, en este caso y a diferencia del predictivo, se pretende determinar la causa "más" raíz que puede provocar una falla sintomática con el fin de desviar una tendencia indeseable.

Con el mantenimiento predictivo logramos anticiparnos a la falla funcional, pero muchas veces la situación del elemento que se monitorea es irreversible (Ej: bolillas deterioradas de un rodamiento, rayaduras en la pista exterior, desprendimientos metálicos en los dientes de engranajes, contactos eléctricos desgastados, etc.). En lugar de ello, el mantenimiento proactivo busca anticiparse y establecer con la debida antelación, la causa raíz de falla.

Una de las técnicas más usadas es la tribología, que permite monitorear ciertas propiedades de los lubricantes para evitar el desgaste de la máquina y aumentar su vida útil. Identificar síntomas adversos, brinda la oportunidad de tomar acciones restaurativas para desviar tendencias y mejorar las condiciones de operación sin llegar a la falla sintomática irreversible.

---

1 Ver "Tipos de Fallas" punto 1.2.2.

Algunos ejemplos de mantenimiento proactivo:

√ Monitoreo de contaminantes de un lubricante.
√ Conteo de partículas.
√ Alineación y balanceo.
√ Monitoreo de viscosidad y acidez de lubricantes.

1.4.7 Mantenimiento Detectivo[1]

Son las acciones tendientes a poner de manifiesto fallos ocultos que se dan básicamente en dispositivos redundantes o de protección. Identificar un fallo oculto y eliminarlo, aumenta la disponibilidad del dispositivo de seguridad. De no tomarse ninguna acción ante este tipo de fallos, y de suceder una falla funcional de la función cargada a proteger, estaríamos ante una falla simultánea.

Algunas estimaciones aseguran que más del 40% de los modos de falla que ocurren en la industria, son ocultos. Lamentablemente, algunas compañías aún no los identifican ni tratan separadamente. El resultado es una gran cantidad de fallas funcionales por este motivo.

No darles un tratamiento particular lleva a más mantenimiento preventivo, no siendo esto último, siempre, lo más beneficioso.

1.4.8 Mantenimiento Previsivo

Este tipo de acciones no son, por lo general, llevadas a cabo por personal de mantenimiento ya que tratan de minimizar la ocurrencia de futuros fallos durante la etapa de diseño.

En muchas aplicaciones tecnológicas se utilizan técnicas de simulación para representar posibles fallos de la instalación. Estas herramientas posibilitan plantear alternativas de solución y realizar las modificaciones o ajustes convenientes disminuyendo la probabilidad de falla del conjunto. En ciertos casos, debido al alto nivel de confiabilidad requerido, es necesario un análisis a tiempo inicial y disminuir la probabilidad de fallo reiterado. Se agrupan aquí todas aquellas técnicas de mejora utilizadas durante el proceso de diseño (diseño básico) para optimizar tareas de mantenimiento, aumentar la mantenibilidad, o minimizar las consecuencias de los fallos. Algunas herramientas útiles son el FMEA (Análisis de modos de falla y sus efectos) ó el RCD (Diseño Centrado en Confiabilidad).

1.4.9 Mantenimiento Imperativo ó Legal[2]

Ciertas instalaciones deben cumplir con requisitos solicitados por organismos gubernamentales dado que sus modos de falla pueden tener consecuencias para la seguridad de las personas o el medio ambiente. Existen regulaciones de cumplimiento obligatorio sobre la realización de tareas tales como inspecciones, chequeos, pruebas y calibraciones. Las mismas deben incorporarse al Plan de Mantenimiento como mandatorias.

En rigor, estas rutinas serán incluidas en el Plan de Mantenimiento como "Imperativas", pero constituyen alguna de las estrategias mencionadas anteriormente (preventivas, predictivas o detectivas). De todas formas, suelen identificarse separadamente dado su carácter mandatorio por razones externas a los intereses de la compañía.

---

1 Estrategia de Mantenimiento tendiente a identificar fallos ocultos. Ver RCMII (Reliability Centred Maintenance) John M. Moubray[2004], página 174.
2 "Organización y Gestión Integral de Mantenimiento" de Santiago García Garrido, Ed. Díaz de Santos, página 23.

Algunos ejemplos de instalaciones capaces de contar con Mantenimiento Imperativo, son:

√ Recipientes o equipos sometidos a presión, y sus sistemas de control o seguridad.
√ Recipientes para almacenar o transportar productos químicos.
√ Instalaciones para el transporte de energía eléctrica.
√ Estaciones compresoras de gas.
√ Equipos o sistemas de Seguridad (Redundantes o de Protección)
√ Sistemas de alarma e instalaciones contra incendios.
√ Elevadores que entrañen un riesgo para la seguridad.
√ Medios de transporte y vehículos.

Un equipo puede estar sometido a más de un tipo distinto de mantenimiento dependiendo de sus modos de falla y su contexto operativo. Los tipos de mantenimiento no son mutuamente excluyentes.

Resumen de aplicación

1.1 Introducción

- *El Mantenimiento debe estar alineado con la misión, visión y objetivos de la Empresa.*
- *Mantenimiento maneja parámetros relativos, no absolutos. La hipótesis del contexto establece que todos los sistemas son influenciados por el entorno de funcionamiento y las necesidades que se tengan de un equipo estarán signadas en gran medida por ese contexto.*
- *Mantenimiento debe garantizar el cumplimiento de las funciones de los activos; las funciones son relativas al contexto operativo. Mantener los equipos manifiesta el concepto de absolutismo; mientras que la manutención de sus funciones, tiene un carácter relativista.*
- *La disponibilidad es una de las variables más importante cuando se diseñan los Planes de Mantenimiento. Se debe determinar claramente el valor deseado. Tener como visión la "máxima disponibilidad" es apropiado como visión conceptual, nunca como parámetro de diseño de los Planes de Mantenimiento.*
- *El personal de mantenimiento requiere una capacitación permanente.*
- *La mayoría de las compañías buscan aumentar su ingreso neto por ventas, no bajar sus costos.*
- *Mantenimiento tiene como misión lograr los niveles establecidos de disponibilidad para las funciones de la instalación en su contexto operativo, valiéndose de talentos humanos, recursos, activos, controles y mecanismos de gestión; y satisfaciendo los niveles de Producción / Servicio comprometidos en un determinado horizonte de validez con los estándares de seguridad vigentes y sin incurrir en gastos que no contribuyan con el sostenimiento de las condiciones anteriores.*

1.2 Disponibilidad

- *Las funciones de un equipo son todas aquellas condiciones de funcionamiento (capacidad, calidad, seguridad, etc.) que debe satisfacer dentro del contexto operativo, teniendo en cuenta los estándares de funcionamiento establecidos.*
- *Una falla es la pérdida de capacidad de trabajo, total o parcial, de un componente (equipo) para satisfacer el nivel de operación establecido y solicitado por la función.*
- *Las **causas** o **razones** que originan una pérdida de función (falla) y que eventualmente puede ocurrir en alguna de las partes individuales de una máquina como proceso de degradación conocido o aleatorio, se denomina **modo de falla**.*
- *Dada una determinada pieza, y habiendo funcionado satisfactoriamente hasta un tiempo t, se define a la tasa de fallas (o función de riesgo) como la probabilidad condicional de que sufra un fallo en un instante de tiempo siguiente $[t+\Delta t]$.*

Resumen de fórmulas

Indicador	Fórmula	Descripción / Aplicación
MTBF	$MTBF = \frac{T_o - T_{np}}{Cf}$	*Para equipos reparables, considerando conocidos sus tiempos de operación y de paradas no programadas, así como la cantidad de fallas.*
	$MTBF = \frac{(T_o \cdot n) - \sum_{i=1}^{n} T_{np(i)}}{\sum_{i=1}^{n} Cf_{(i)}}$	*Para un conjunto de equipos (independientes) reparables, con igual tiempo de operación.*
	$MTBF = \frac{T_o - T_{np(MV)}}{Cf_{(MV)}}$	*Para una agrupación de equipos reparables y en línea.*
	$MTBF = E(t) = \int_0^\infty t\, f(t)\, dt = \int_0^\infty C(t)\, dt$	*Expresión general, conocida la función C(t).*
MTTF	$MTTF = \frac{T_o \cdot n}{\sum_{i=1}^{n} Cf_{(i)}}$	*Para n ítems no reparables, con igual tiempo de operación.*
MTTR	$MTTR = \frac{T_{tr}}{C_r}$	*Para un ítem reparable, cuyo tiempo de reparación es significativo respecto al tiempo de operación.*
	$\varepsilon = \frac{1}{MTTR}$	
	$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} n_i \lambda_i t_{ri}}{\sum_{i=1}^{n} n_i \lambda_i}$	*Para un equipo con n elementos, conociendo la tasa de fallas y el tiempo medio de reparación de cada uno.*
Tasa de fallas	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)}$	*Expresión general, conocidos f(t) y C(t).*
	$\lambda = \frac{Cf}{T_0} = \frac{1}{MTTF}$	*Para componentes cuya distribución de fallos es exponencial.*
	$\lambda(t) = \alpha\ \beta\ t^{(\beta-1)}$	*Para componentes cuya distribución de fallos responde a la ley de distribución de Weibull.*
Confiabilidad	$C(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(t/MTTF)}$	*Para componentes en funcionamiento cuya distribución de fallos es exponencial.*
	$C(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-(t-\mu)^2 / 2\sigma^2}\, dt$	*Para componentes cuya distribución de fallos es normal.*
	$C(t) = e^{-\alpha t^{\beta}}$	*Para componentes cuya distribución de fallos responde a la ley de Weibull.*
	$C_{(n\ en\ m)} = 1 - \sum_{i=n+1}^{m} \binom{m}{i} \lambda^i \cdot (1-\lambda)^{(m-i)}$	*Cuando un conjunto de m equipos iguales y pasivos requiere m-n para funcionar. Variable aleatoria discreta.*
	$C(t)_s = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{[(\lambda t)^i e^{(-\lambda t)}]}{i!}$	*Para un conjunto de n equipos (elementos) donde n-1 es la cantidad de elementos en stand-by, sin reparación. Variable aleatoria discreta.*
	$C(x)_s = \prod_{i=1}^{n} C(x)_i$	*Para un conjunto de equipos (modos de falla) cuya red de agrupación es serie.*
	$C(x)_s$ = Promedio de los $C(x)_i$	*Para un conjunto de equipos (modos de falla) independientes.*
	$C(x)_s = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - C(x)_i]$	*Para un conjunto de equipos (modos de falla) cuya red de agrupación es paralela. Variable aleatoria continua.*
	$C(t)_s = e^{-(\frac{\lambda^2}{\mu})^t}$	*Dos equipos, uno de los cuales se encuentra en stand-by, considerando además que se repara el equipo protegido cuando falla.*

Indicador	Fórmula	Descripción / Aplicación
Mantenibilidad	$M(t) = 1 - e^{-\varepsilon t} = 1 - e^{-(t/MTTR)}$	*Para equipos reparables cuya tasa de reparación es conocida y constante.*
Disponibilidad	$D_o = \frac{(T_o - T_{np})}{T_o} \times 100$	*Valor porcentual para aquellos equipos donde se conoce el tiempo para operar y el tiempo de paradas no programadas.*
	$D_o = \frac{\varepsilon}{\lambda + \varepsilon}$	*Para equipos que se reparan luego de la detención.*
	$D_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100$	

- *Se entiende como Confiabilidad C(t), a la probabilidad de que un componente o equipo satisfaga las funciones establecidas sin fallas durante un tiempo dado y en un contexto definido.*
- *La confiabilidad de un equipo podrá cambiar si hace lo propio el contexto operativo en el que se desarrolla.*
- *Los dispositivos de Seguridad se dividen en Redundantes y de Protección. Un dispositivo redundante puede ser pasivo o activo. Los primeros se encuentran en reposo o sin carga mientras cumplen la función de espera. Las redundancias activas permanecen en funcionamiento y actúan como sistemas duplicados, aumentando la disponibilidad del conjunto.*
- *Los Dispositivos de Protección se instalan para interrumpir el funcionamiento de otro sistema en estado de falla, contener una situación peligrosa, o indicar a través de una alarma el mal funcionamiento o desvío de alguna variable de funcionamiento o de proceso.*
- *La mantenibilidad es la probabilidad que tiene un ítem en estado de falla de ser diagnosticado y reparado con éxito en un tiempo t, y en el contexto de operación establecido.*
- *La mantenibilidad inherente forma parte de la mantenibilidad, y se define como aquella que posee el equipo desde el punto de vista del diseño.*
- *La Disponibilidad Operacional de un equipo es el porcentaje del tiempo en que estuvo disponible para el proceso de operación en las condiciones de seguridad y calidad pactadas.*

1.3 Patrones de Falla

- *Un patrón de fallas identifica la chance que tiene un componente de sufrir averías a lo largo de toda su vida. El patrón de fallas es el resultado de la acción simultánea de los patrones de falla de todos los modos de falla del componente.*
- *La vida útil (VU) de un componente es el intervalo de tiempo desde su puesta en marcha hasta el momento a partir del cual (para la mayoría de esos componentes) aumenta significativamente la tasa de fallas (λ).*

1.4 Tipos de Mantenimiento

- ***Mantenimiento Correctivo*** *(Una Acción Reactiva No Programada)*
  Consiste en la reparación de las averías o fallas funcionales a medida que se van produciendo. Presenta como característica que se necesita poco planeamiento pero en muchas ocasiones genera un gran impacto en la producción, deteniéndola y generando grandes pérdidas en cantidad y calidad. Por lo general, se debe proceder en forma acelerada lo que aumenta el riesgo de accidentes.

- ***Mantenimiento Restaurativo*** *(Una Acción Reactiva Programada)*
  Como consecuencia de las rutinas de mantenimiento Pro-activas, puede detectarse que ciertos parámetros están fuera del estado óptimo de funcionamiento, aún sin haberse producido todavía la falla funcional. También se lo conoce como mantenimiento de restauración programada (MRP).

- ***Mantenimiento Mejorativo*** *(Una Acción Reactiva Programada)*
  Contempla tareas de Rediseño para optimizar el proceso productivo, eliminar los fallos crónicos, o bien aumentar la mantenibilidad de los activos.

- ***Mantenimiento Preventivo***
  Se realiza a intervalos de tiempo, horas, ciclos, etc. regulares bien definidos y sin importar el estado del ítem a mantener. Normalmente se realizan con el equipo o instalación fuera de servicio y consiste en el reemplazo o restauración cíclica de componentes.

- ***Mantenimiento Predictivo***
  Propone la idea de que es posible la identificación de síntomas prematuros de desperfectos o desajustes, algún tiempo antes de que se produzca una detención no deseada. Es decir, se presume que ciertos componentes "avisan" antes de llegar a la falla funcional.

- ***Mantenimiento Proactivo***
  Tipo de mantenimiento que pretende determinar la causa "más" raíz que puede provocar una falla funcional con el fin de desviar una tendencia indeseable.

- ***Mantenimiento Detectivo***
  Son las acciones tendientes a poner de manifiesto fallos ocultos que se dan básicamente en dispositivos redundantes o de protección. Identificar un fallo oculto y eliminarlo, aumenta la disponibilidad del dispositivo de seguridad.

- ***Mantenimiento Previsivo***
  Se trata de minimizar la ocurrencia de futuros fallos durante la etapa de diseño. Se agrupan aquí las técnicas de mejora utilizadas durante el proceso de diseño (diseño básico) para optimizar tareas de mantenimiento, aumentar la mantenibilidad, o minimizar las consecuencias de los fallos.

- ***Mantenimiento Imperativo ó Legal***
  Hay normativas que exigen realizar tareas de inspección, chequeo, prueba, calibraciones, etc. sobre equipos cuyos fallos pueden tener consecuencias sobre la seguridad de las personas o el medio ambiente.

Capítulo 2

Mantenimiento Preventivo

Si quieres construir un barco, no empieces a juntar madera, a repartir tareas y a planear el trabajo. Empieza mejor despertando en tu gente la necesidad de explorar los océanos infinitos[1].

---

1 Antoine de Saint Exupery.

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Identificar los patrones de falla en los que es aplicable el Mantenimiento Preventivo.
- √ Entender el proceso de Gestión que fundamenta su utilización.
- √ Reconocer el campo de aplicación y las limitaciones del Mantenimiento Preventivo.
- √ Determinar sobre qué modos de falla es posible accionar con esta herramienta.
- √ Estimar el intervalo más conveniente para las Tareas Preventivas.
- √ Confeccionar Hojas de Sustitución o Reparación Programadas.
- √ Comprender y diseñar Rutas de Inspección o Chequeos de Recorrida.
- √ Confeccionar Hojas de Ruta para lubricación.
- √ Entender los procesos básicos para la Calibración de equipos.

Índice de Contenidos

2.1 Mantenimiento Preventivo (Programado)
Reseña Histórica
Alcance y Definición

2.2 Reemplazos y Conservaciones Programadas
Hipótesis y condiciones de aplicación
Frecuencia de las Tareas Preventivas
Combinación de Tareas (para distintos modos de falla)

2.3 Mantenimiento de Rutina - Chequeos de Recorrida
Rutinas de Inspección
Frecuencia de las Rutinas de Inspección
Inspecciones de Área
Puesta en marcha de las Rutinas de Inspección

2.4 Rutas de Lubricación
Frecuencia para las Rutas de Lubricación

2.5 Calibración
Definiciones útiles
Determinación de la incertidumbre
Criterio de aceptación para variables de proceso
Combinación de sustitución o restauración cíclica y calibración
Frecuencia de Calibración
Condiciones de almacenaje y mantenimiento

Resumen de aplicación

2.1 Mantenimiento Preventivo (Programado)

Una estrategia antigua pero poderosa

Las acciones de carácter Pro-activo tienen como finalidad aumentar la disponibilidad de los activos industriales a través de la disminución de las paradas no programadas. El Mantenimiento Preventivo pertenece a este grupo y tiene la característica de aprovechar el momento más oportuno para intervenir los equipos maximizando su eficiencia. Si la planificación es adecuada, es posible preparar piezas, herramientas, repuestos e insumos, seleccionando, además, al personal más idóneo en la ejecución de cada trabajo, asegurando seguridad y rapidez.

Sin embargo, y como se verá oportunamente, si no se realiza un análisis técnico-económico adecuado y se aplica Mantenimiento Preventivo (MP) deliberadamente, pueden incrementarse sustancialmente los gastos de mantenimiento sin obtener, como contrapartida, mejoras en la confiabilidad ni en la disponibilidad.

Formando parte de sus tareas se encuentran la sustitución periódica de partes, restauración e inspección de equipos, limpieza, lubricación y calibración de instrumentos, entre otros.

Se lleva a cabo a intervalos fijos de tiempo, horas de marcha, ciclos, kilómetros, volumen de producción, etc. Estos intervalos deben estimarse con la mayor exactitud posible, y no debiera importar el estado particular del elemento a sustituir o restaurar al momento de realizar el trabajo. Normalmente es necesario que la instalación se encuentre fuera de servicio. Si el efecto de los modos de falla que se pretenden evitar no compromete la seguridad, se deberá entonces evaluar el beneficio económico que de su aplicación se espera obtener.

2.1.1 Reseña Histórica

Una evolución hacia la seguridad, la eficiencia y los costos

El mantenimiento siempre existió. Desde que el hombre comenzó a fabricar objetos para uso personal, le fue imprescindible llevar a cabo alguna restauración de los mismos. Muy probablemente en los comienzos de la fabricación de utensilios o herramientas de mano, éstos se desechaban una vez utilizados. Pero con la evolución misma del hombre evolucionaron también los objetos que fabricaba y muchos podían ser reutilizados si se efectuaba alguna reparación.

Ya a comienzos del siglo XX la industria se tornó cada vez más mecanizada y, aunque los niveles de producción eran bajos, se realizaban tareas de limpieza y lubricación a cargo del mismo personal que operaba las máquinas. El consumo y la demanda de productos industriales no llegaba a los niveles actuales y las máquinas estaban por lo general sobredimensionadas respecto a las necesidades del mercado. Básicamente se aplicaba la corrección frente al defecto o lo que hoy conocemos como **Mantenimiento Correctivo**.

Fue a partir de 1950 cuando la demanda global de bienes de consumo aumentó de forma abrumadora. Los procesos industriales se hicieron cada vez más intensivos. La detención de las máquinas provocaba grandes pérdidas económicas a las compañías. Aumentó la mecanización, la automatización y la competitividad. Ya no había posibilidad de aprovechar los *tiempos muertos* de producción; sencillamente porque no existían. Era necesario producir en todo momento. Esto naturalmente condujo a que una detención del activo provocara pérdidas económicas de importancia. Surgió, entonces, la idea de prevenir las fallas. Anticiparse a su ocurrencia para que no produjeran un perjuicio mayor.

Se capitalizó la primera gran especialización en mantenimiento. El personal de operación o producción se dedicaría exclusivamente a operar el equipo logrando su máximo rendimiento, mientras que personal especializado en reparaciones estaría dispuesto tanto a **corregir** y **restaurar** las averías una vez sucedidas como a intentar **prevenirlas**.

Estos grupos, liderados por profesionales, comenzaron a identificar que ciertos componentes se comportaban de una manera ligeramente **previsible**. El patrón previsible de desempeño indicaba que hasta cierta edad la probabilidad condicional de falla se mantenía dentro de cierto valor controlable y conocido (recta inferior de la curva de la *bañera*), lo que brindaba valores aceptables de Confiabilidad. Luego, finalizada esta etapa, componentes iguales fallaban en tiempos muy parecidos.

Así, el mantenimiento preventivo de **recambio** o **restauración** fue tomando cada vez más protagonismo, llegando a la década del 60' a ser el más aplicado y difundido.

Los programas de producción se alcanzaban satisfactoriamente con buenos niveles de disponibilidad y costos controlados. El Mantenimiento Preventivo (MP) se imponía como máxima estrategia Pro-activa en materia de prevención de fallas, y como garantía para las funciones de los activos industriales[1].

2.1.2 Alcance y Definición

El mantenimiento preventivo periódico, también conocido como **Mantenimiento Cíclico**, es un tipo de mantenimiento planificado que incluye intervenciones programadas para la reparación del ítem o el cambio de sus componentes a intervalos fijos, sin importar su estado de condición al momento de realizar la tarea.

Decir que *"no importa el estado del ítem a mantener"*, significa que el reemplazo o la reparación no están *condicionados* al estado del ítem cuando se realiza el trabajo. No obstante, es vital la información que nos *trasmite* el componente, pues permitirá optimizar y ajustar el MTBF para futuras intervenciones.

Aprovechando el momento más oportuno para detener la Producción, las tareas preventivas permiten una mejor planificación de los recursos, prolongando el tiempo libre de falla. Se minimizan, además, los riesgos en materia de seguridad operacional debido a que las acciones correctivas de emergencia aumentan notablemente la probabilidad de accidentes o incidentes. De la misma manera, y con buena planificación, ayudan al cuidado del medio ambiente.

Se deberá tener en claro la dimensión de la vida útil, pues todos los reemplazos realizados prematuramente es vida útil desperdiciada imposible de recuperar.

Dentro de un Plan de Mantenimiento Preventivo encontramos:

√ **Reemplazo de equipos, subconjuntos, componentes o piezas.** Transcurrido cierto intervalo, algunos elementos denotan desgaste natural o fatiga, lo que conduce a un aumento importante de su probabilidad de falla. Se manifiesta fundamentalmente en ítems mecánicos móviles expuestos a corrosión, erosión, oxidación o ciclos térmicos de importancia.
La restitución del equipo a su estado original, se logra a través del reemplazo de sus partes.

√ **Conservación, Revisión o Restauración de ítems.** Al igual que el reemplazo de componentes, las acciones de conservación periódica se consideran rutinas de mantenimiento preventivo y consisten en controlar o revisar en forma programada los equipos para llevarlos a su estado de condición básica original. Generalmente requiere el desmontaje, desarme e inspección del sistema.

√ **Rutinas de Inspección y Chequeos de recorrida.** No incluyen reemplazos ni restauraciones programadas, pero suelen integrarse al Plan Preventivo porque representan acciones concretas para la conservación de la condición básica y para corregir defectos. Su costo de realización es bajo frente a los beneficios obtenidos.

√ **Limpieza, Ajuste y Lubricación.** Algunos ítems requieren acciones de conservación para mantenerlos dentro de cierto estado de condición básica. Esto se logra mediante rutinas periódicas de lubricación, ajuste, regulación o limpieza preventiva. Son de muy bajo costo, aunque los beneficios obtenidos son extraordinarios.

√ **Calibración.** El ajuste de parámetros en los instrumentos de proceso valiéndose de patrones, se denomina calibración. Es una acción de MP que contempla medir, controlar y ajustar los parámetros de proceso de acuerdo a patrones certificados. Estas rutinas permiten asegurar que los estándares de calidad solicitados se ajusten a las normativas vigentes.

---

1 Algunos autores identifican esta etapa histórica como "Mantenimiento de 2° Generación".

Las tareas de Mantenimiento Preventivo son acciones periódicas tendientes a prolongar el tiempo libre de fallas inesperadas, defectos o desviaciones en las variables de proceso.

Durante muchos años se pensó que **todos** los elementos tenían un periodo de vida durante el cual la tasa de fallas era estable, es decir, funcionaban con precisión hasta cierta edad para luego deteriorarse rápidamente aumentando la probabilidad de falla. Lamentablemente aún hoy persiste esta idea.

Si bien muchos estudios de confiabilidad iniciados a partir de la década del 60' han demostrado que en realidad son pocos los elementos que responden exactamente a este patrón, todavía se hace necesario estudiar y aplicar el Mantenimiento Preventivo porque existen componentes cuyos modos de fallas dominantes se ajustan bien a la distribución normal y, además, son de baja dispersión.

La situación dominante de desgaste acelerado a partir de cierta edad, se presenta más frecuentemente en equipos que se encuentran en contacto directo con el producto como molinos, recubrimientos, tolvas, cintas transportadoras, transportes a tornillo, etc.

El Mantenimiento Preventivo consiste en reparar un ítem o reemplazar sus componentes en forma periódica, sin importar su estado de condición al iniciar la intervención, y bajo la hipótesis de que el patrón de fallas que rige su comportamiento tiene un período de vida útil conocido, alcanzando finalmente los mismos niveles de confiabilidad y calidad originales.

Los objetivos del Mantenimiento Preventivo se pueden resumir en los siguientes puntos:

√ Aumentar la disponibilidad de los activos industriales a través de la disminución de las detenciones no programadas.

√ Minimizar las averías imprevistas de los equipos.

√ Mejorar el aprovechamiento de mano de obra por medio de la programación de tareas.

√ Mejorar la calidad de productos y servicios.

√ Disminuir el riesgo para el personal en las operaciones de producción y mantenimiento.

√ Minimizar los gastos debido a reparaciones de emergencia.

√ Disminuir el impacto ambiental por medio de una mejor planificación de tareas.

2.2 Reemplazos y Conservaciones Programadas

Buscando el mayor beneficio

Muchos elementos mecánicos en movimiento podrán desgastarse como resultado de su uso[1]. Los componentes se sustituyen cuando el costo de la reparación es mayor al de su reemplazo, o bien cuando existe una alta posibilidad de que la reparación no garantice el estándar de funcionamiento original. En estos casos el ítem es **desechable**.

Vale decir que, sólo es posible y conveniente efectuar una tarea de **conservación sistemática** sobre componentes no desechables y en los casos que se pueda justificar a lo largo del tiempo. Más precisamente, el recambio o sustitución periódica (MP por recambio) justifica su aplicación en situaciones cuya función de densidad de fallas **f(t)** es del tipo normal y de muy baja dispersión para todos los resultados obtenidos; es decir, en aquellos casos para los que la tasa de fallas es creciente a partir de un determinado momento en la mayoría de los elementos.

Veamos el siguiente estudio presentado por Noria-Lantos en sus jornadas de mantenimiento proactivo de lubricantes[2004] (figura 2.2.1). Se muestra el caso de sustitución cíclica para un lote de rodamientos cuando sólo aproximadamente el 6% falló. Si tomamos la línea punteada como límite para el recambio de todos los rodamientos, estaremos desperdiciando gran cantidad de vida aprovechable en la mayoría de ellos. De esta forma, se corre el riesgo de incrementar los gastos de operación (GO) debido al aumento en los gastos de mantenimiento. Tener en cuenta que estos últimos forman parte de los gastos de operación.

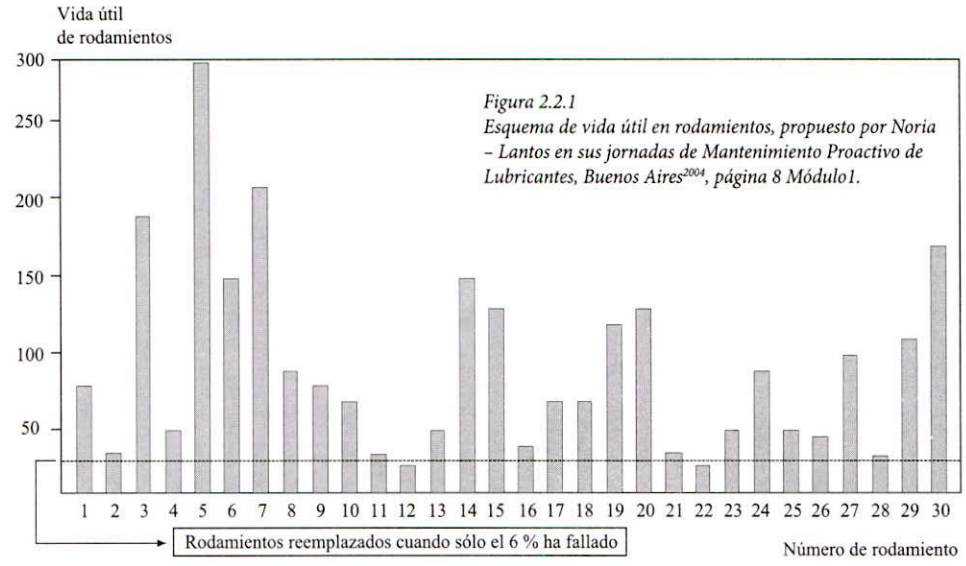


Figura 2.2.1
Esquema de vida útil en rodamientos, propuesto por Noria – Lantos en sus jornadas de Mantenimiento Proactivo de Lubricantes, Buenos Aires[2004], página 8 Módulo1.

Aquí queda en evidencia que, si la dispersión de fallas es alta, establecer un límite para el recambio sistemático tiene el doble inconveniente de *llegar tarde* en algunos componentes y *perder* vida útil en otros.

Es importante hacer notar que para las situaciones de alto riesgo en materia de **seguridad**, todas las acciones preventivas deberán garantizar la supervivencia del elemento luego de efectuada la tarea y hasta la próxima intervención.

Para el caso en que los componentes son no desechables, los conceptos anteriores tienen aún validez, sólo que en este caso se controlan, ajustan, revisan o reparan en lugar de sustituirse. Involucra rutinas de revisión de estado, reparación o restitución de la condición básica. Una tarea de reparación habitualmente es más conveniente que convivir con la falla, de todas maneras se deberá comprobar su beneficio técnico y económico a lo largo de un horizonte de análisis. Los acondicionamientos periódicos cuyos defectos no conllevan un perjuicio para la producción o las ventas, deberán igualmente justificarse económicamente.

Es tal el desarrollo alcanzado por los procesos de mejora, que no es suficiente con reducir la cantidad de fallas; se hace imprescindible también optimizar los gastos de operación que como consecuencia de ellos se generan.

---

1 Ver 2.1.2. Alcance y Definición.

Se comienza el análisis para instalaciones cuya avería afecta a la seguridad, para luego hacer lo propio en aquellas fallas que atentan contra el volumen de ventas, calidad de producción, pérdidas o lucro cesante.

2.2.1 Hipótesis y condiciones de aplicación

El Mantenimiento Preventivo tiene un amplio rango de aplicación con resultados muy favorables. Aunque en muchos casos sea la mejor manera de prevenir las averías, no significa que su utilización sea siempre beneficiosa. Veremos en esta parte que sólo se justifica si se verifican algunas hipótesis.

Para comprender la ubicación temporal de las rutinas preventivas a lo largo de la vida de un elemento, es apropiado repasar la relación que existe entre una función de distribución de fallas f(t), la Confiabilidad C(t) y la tasa de fallas λ(t). Esta relación queda establecida por la ecuación ya vista:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)}$$

El caso más representativo es la conocida *curva de la bañera*. Resulta interesante apreciar dicha relación por medio del comportamiento simultáneo de las tres funciones mencionadas.

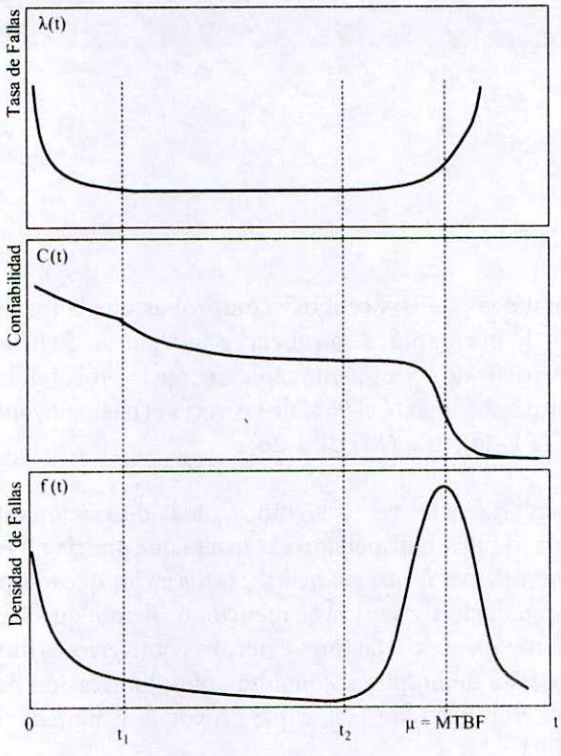


Figura 2.2.2
Comportamiento de las funciones f(t), C(t) y λ(t).

En la figura 2.2.2 se muestran las etapas comprendidas entre $[0;t_1]$, $[t_1;t_2]$ y $[t_2;\infty]$. La primera presenta mortalidad infantil, la segunda representada por una distribución exponencial y, la última, con deterioro acelerado cuyo comportamiento lo rige la distribución normal. El Mantenimiento Preventivo tendrá aplicación efectiva si la última etapa tiene una dispersión o desviación baja.

La figura 2.2.3 ilustra únicamente el sector para $t > t_2$. Mientras exista un momento a partir del cual el componente describe una distribución normal, podremos plantear la posibilidad de efectuar rutinas preventivas periódicas. A partir de t_2, la función de densidad para una distribución de este tipo queda expresada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} \qquad -\infty < t < \infty$$

Donde μ es el valor esperado o tiempo medio entre fallas (MTBF), σ la desviación estándar y σ^2 la varianza. La curva f(t) es simétrica respecto a MTBF si el elemento responde a esta distribución.

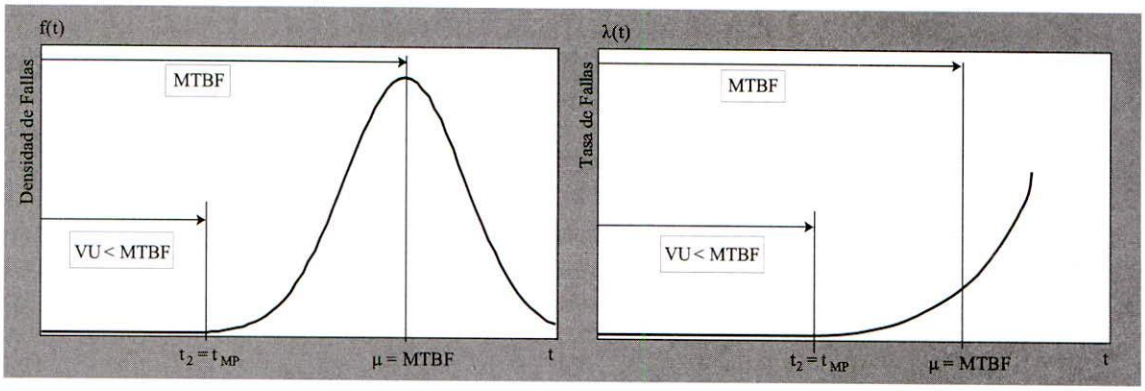


Fig. 2.2.3
Función densidad de fallas f(t) y tasa de fallas λ(t), para la distribución normal.

La hipótesis fundamental consiste en **aceptar** y **comprobar** que la mayoría de las veces el componente fallará después de t_{MP}, lo que significa que obedece a un patrón de fallas ajustado a un período de vida útil consistente **VU**. A partir de t_{MP} aumenta rápidamente la probabilidad de falla acumulada F(t).

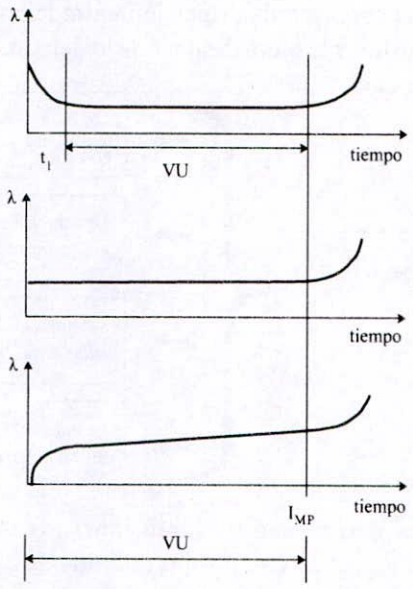
Ya se mencionó que aproximadamente el 95% de las veces el elemento sufrirá averías en el intervalo comprendido entre $t = (\text{MTBF}-2\sigma)$ y $t = (\text{MTBF} + 2\sigma)$.

Ahora bien, decir la "mayoría de las veces" significa que la desviación estándar (σ) es baja. En muchas ocasiones, si bien existe MTBF, su dispersión es tan alta que podría no resultar conveniente aplicar MP. Habría casos en los que se *desperdiciaría vida útil* y otros en los que ocurría una emergencia correctiva antes del reemplazo o reparación, como ya se mencionó. Siendo que la dispersión puede obedecer a factores intrínsecos del componente o a factores externos como errores humanos durante el montaje, mala utilización del activo, falta de limpieza, contaminantes, lubricación deficiente, etc., es necesario trabajar puntualmente para eliminar todo factor que provoque y aumente la dispersión. A esto se lo denomina "limpiar el MTBF".

Si la limpieza del MTBF se logra, **y la dispersión intrínseca del ítem en funcionamiento es baja**, entonces tal vez sea conveniente aplicar alguna rutina de sustitución o restauración periódica debido a que la diferencia entre t_{MP} y MTBF es pequeña. De lo contrario es evidente que no.

La creencia de que siempre será más conveniente alguna tarea de MP, radica en el hecho de que lamentablemente aún se piensa que **todos** los elementos (eliminados los factores externos) fallan en tiempos muy cercanos a MTBF.

La figura siguiente describe otros patrones de falla para los que también podría ser aplicable una Rutina Preventiva.



Luego de I_{MP} comienza la zona de desgaste acelerado

Figura 2.2.4
Período de Vida Útil para diferentes patrones de falla.

La **tasa de fallas** o probabilidad condicional, aumenta rápidamente a partir de t_{MP}. Recordemos el concepto de probabilidad condicional de fallas.

Estando una pieza en condiciones óptimas de funcionamiento en t, se define probabilidad condicional de falla a la probabilidad de que falle en $t + \Delta t$. *Condicional* significa que la probabilidad de falla en $t + \Delta t$, es "condicional" a que se encuentre operativo en t.

Dado que la falla en $t + \Delta t$ es independiente de que no haya fallado en t, se dice que el elemento (para el modo de falla analizado) no posee "memoria" de falla. Para comprender esto más claramente veamos el siguiente ejemplo sencillo de un cristal de mampostería.

Ejemplo 2.2.1
Tomemos el caso de un cristal instalado en la puerta de entrada de una Universidad. Asúmase que únicamente el modo de falla que podría ocasionar la rotura (falla) del vidrio es: *"el vidrio se rompe por el impacto de una piedra"*. La probabilidad de que el vidrio sea impactado por una piedra es la misma todos los días, porque las condiciones que pueden producir el evento son completamente aleatorias. Esto significa que estando sano el vidrio en cualquier momento, la probabilidad de que se rompa por esa causa es siempre la misma, es decir que no aumenta conforme los días transcurren. Vale decir que, la probabilidad de que se rompa un **jueves** no es mayor que la del **miércoles**, habiendo estado ileso el día anterior (es decir el miércoles).

Supongamos que luego de algunas estimaciones se estableció que esa probabilidad es de 1/1000 = 0,001 para cualquier día dado. Es decir que, siendo por ejemplo 1° de enero, uno podría decir que la probabilidad que el vidrio se rompa el 18 de Noviembre es **0,001** siempre y cuando el 17 de Noviembre haya estado sano.La probabilidad acumulada de que se rompa habiendo transcurrido un tiempo t, no será 0,001. Por ejemplo, el 1° de enero no podemos decir que la probabilidad de encontrar el vidrio sano el 31 de diciembre es sólo 1 - 0,001. Para calcular esa probabilidad acumulada (Confiabilidad) al cabo de un determinado tiempo, se tendrá que aplicar la ley de distribución exponencial según se vio en el Capítulo 1.

Trasladando este ejemplo al primer patrón de fallas mostrado en 2.2.4, podemos asegurar que aunque $\lambda = 1/\text{MTBF}$ es constante entre t_I y t_{MP}, la probabilidad que el componente llegue a t_{MP} sin fallas desde t_I no es λ; sino que debe aplicarse $C(t_{MP}) = e^{-(t_{MP}/\text{MTBF})}$.

Conforme $t > t_{MP}$, el valor de la probabilidad condicional de falla (λ) aumenta rápida y progresivamente; *"cuanto peor se pone, más rápido se pone peor"*.

Reiteramos una vez más el concepto de dispersión entre fallas pues cuanto mayor sea ésta, mayor será el *riesgo preventivo* por sustituir la pieza después de lo debido, o lo que es lo mismo, que la falla nos sorprenda antes de la intervención.

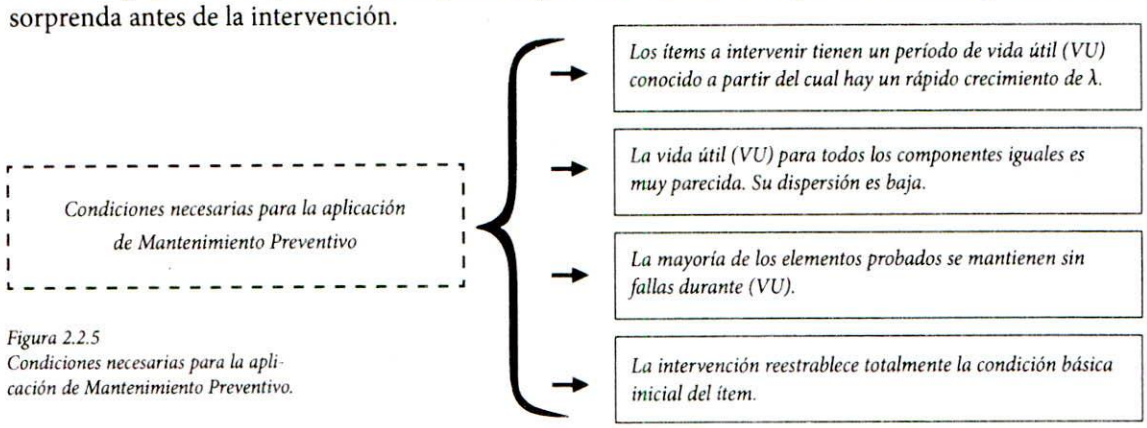


Figura 2.2.5
Condiciones necesarias para la aplicación de Mantenimiento Preventivo.

De lo visto hasta ahora, se desprenden las condiciones necesarias para llevar adelante rutinas de reemplazo o restauración periódica de equipos no redundantes. Un cambio antes de tiempo (menor a t_{MP}) sólo provocará un desperdicio en la capacidad de uso del ítem.Recordar que si el comportamiento del modo de falla analizado de la pieza responde únicamente a la ley exponencial de fallas, la aplicación de MP no sólo no redundará en beneficios sino que podría incluso afectar seriamente la confiabilidad de todo el sistema, si existe la posibilidad de dejarlo fuera de servicio debido a la propia intervención. En estos casos, la componente de mortalidad infantil *inyecta* esta probabilidad durante la puesta en marcha.

Además, iría en desmedro de la disponibilidad por el tiempo que, aunque optimizado y planificado, insume una tarea de este tipo.

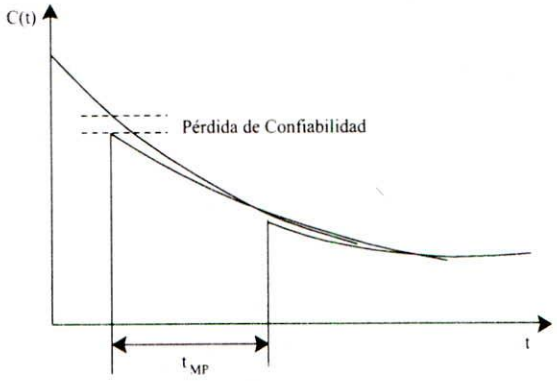


Figura 2.2.6
Disminución de la Confiabilidad con Mantenimiento Preventivo cuando λ = Cte[1].

Aún mayor sería el impacto desfavorable, tanto en la disponibilidad como en la confiabilidad, si la tasa de fallas fuese decreciente, es decir si nos encontrásemos en el periodo $[0,t_1]$ de la figura 2.2.2. El recambio, muchas veces realizado *"por las dudas"*, no solamente pone en riesgo la disponibilidad sino también la confiabilidad.

2.2.2 Frecuencia de las Tareas Preventivas

En la mayoría de los casos, para establecer el intervalo entre dos tareas de mantenimiento, se deben realizar estimaciones y aproximaciones de índole estadístico. Dichas aproximaciones no necesariamente le quitan validez al método en la medida que sean hechas con un criterio técnico adecuado y no basándose sólo en el histórico de fallas.

La experiencia acumulada por especialistas durante muchos años, indica que si los datos estadísticos o *historial del equipo* no están en manos de personal idóneo, tienden a empeorar los resultados de las decisiones adoptadas.

---

1 Introducción al Proyecto de Ingeniería[2003]*. Enrique Villamil García y Miguel J. García Hernández, página 156.*

Es frecuente creer que es suficiente con tener un gran banco de datos para mejorar rápidamente cualquier proceso de gestión en mantenimiento. Se suele decir: *"Sólo es cuestión de juntar toda la información y tomar buenas decisiones"*. Lamentablemente la situación no es tan sencilla. Un gran registro, además, insume mucho tiempo de carga y de mantenimiento para recién después comenzar a mejorar el proceso.

El error radica principalmente en suponer que un conjunto de datos es información. En mantenimiento es preciso contar con información, no solamente con datos. Muy pocas son las cosas que se obtienen...**automáticamente**. La mayoría requiere el análisis de especialistas.

*La **información** sólo puede generarla un talento humano, los **datos** un sistema.*

El paradigma de una *Gran Base de Datos*, no sólo no mejora **por sí solo** los indicadores de Confiabilidad sino que, además, en muchas ocasiones los empeora.

Por el contrario, la cualidad que será al menos indispensable es la experiencia que podamos recoger de las personas que integran el equipo de trabajo. Los conocimientos del personal cotidianamente involucrado y comprometido con su trabajo, supera ampliamente todo registro disponible en los mejores y más grandes sistemas informáticos. Es cuestión de aprovechar de cada uno su máximo potencial y constituir un equipo multidisciplinario o *círculo virtuoso de talentos*. Por medio de preguntas bien formuladas, la información que el personal técnico de piso puede generar es, lamentablemente, muchas veces ignorada. Obviamente, sería inútil negar la ayuda que brindan hoy las herramientas informáticas: simplemente hay que darles el uso adecuado comprendiendo sus limitaciones y potenciando al máximo su aporte.

√ La Seguridad y el Mantenimiento Preventivo Periódico

Existen en la práctica una gran variedad de instalaciones que cumplen funciones vitales para la seguridad. La interrupción de alguna de estas funciones (falla funcional u operacional) puede poner en riesgo la integridad física de personas y medio ambiente. El mantenimiento preventivo es una herramienta importante en el control del riesgo industrial.[1]

El intervalo de tiempo (o cualquier otra variable) entre dos trabajos de reemplazo, revisión o reparación (t_{MP}) deberá, ante todo, devolver la resistencia a la falla que poseía el sistema con anterioridad a la intervención.

La figura 2.2.7 muestra que antes de t_{MP}, el área bajo la curva debe ser cero o tener un valor extremadamente pequeño para que el riesgo de padecer una falla imprevista (emergencia) sea inferior al tolerado por la organización para esa consecuencia. Se debe asegurar que el *riesgo preventivo* tienda a cero antes de t_{MP}. Para favorecer que este riesgo se mantenga dentro de los límites tolerados, es frecuente utilizar lo que en diseño industrial se llaman sistemas a **prueba de errores** ó dispositivos "poka-yoke"[2]. Dotar a los sistemas de esta característica, por cierto más costosa, minimiza la posibilidad de cometer errores durante el proceso de ensamblado o montaje de componentes. Estos diseños impiden realizar ciertas operaciones en forma incorrecta, garantizando que la probabilidad de introducir fallas prematuras sea disminuida. Los diseños son poka-yoke cuando únicamente permiten una posición de armado. Esto evita errores por montajes deficientes, uno de los más comunes en las acciones de mantenimiento. La Confiabilidad intrínseca del componente a sustituirse en el MP sistemático, no se ve afectada con los diseños poka-yoke.

Otra alternativa poka-yoke es el bloqueo por descalibración. Se busca impedir el desajuste de componentes en forma accidental montando trabas mecánicas o haciendo indispensable el uso de herramientas especiales que solamente posea personal idóneo.

Asimismo, algunos diseñadores de equipos trabajan en forma conjunta con futuros usuarios y mantenedores eliminando los defectos que puedan afectar la mantenibilidad de la instalación.

---

1 Ver Capítulo 8, Administración y Programación del Mantenimiento.

2 De la palabra japonesa "poka" que significa "error inadvertido" y "yoke" que significa prevención, del japonés Shigeo Shingo.

Lamentablemente en aquellas situaciones cuya falla imprevista tiene perjuicios graves en seguridad, será imposible permitir una tasa de fallas mayor que cero antes de t_{MP}. Durante $[0,t_{MP}]$ no se puede correr el riesgo de aplicar **Mantenimiento Correctivo.**

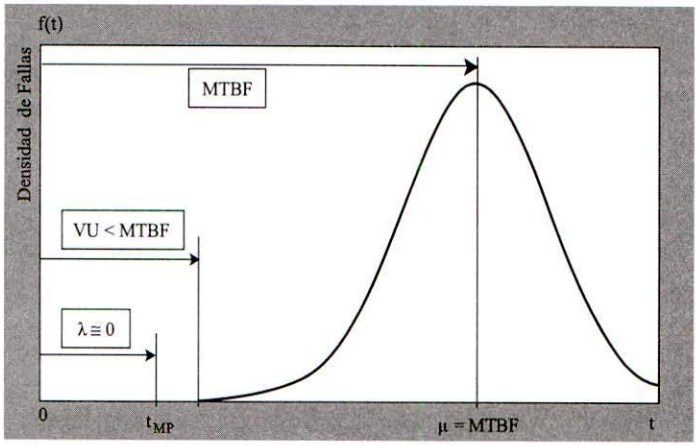


Figura 2.2.7
Límite t_{MP} para el Mantenimiento Preventivo.

El tiempo entre dos reemplazos periódicos será t_{MP} y no es apropiado justificar conveniencia económica. El intervalo será lo suficientemente menor a VU, de modo que el riesgo asumido entre 0 y t_{MP} sea despreciable.

$$t_{MP} << \text{VU} \qquad (2.2.1)$$

con $\lambda(t) = 0$, para $t < t_{MP}$

La metodología RCM señala claramente que solamente valdrá la pena realizar una tarea de sustitución programada, si la misma reduce a un nivel aceptable la probabilidad de falla entre 0 y t_{MP}. *Un nivel aceptable significa una probabilidad extremadamente pequeña*[1].

Una manera factible de ampliar el t_{MP} haciéndolo más cercano a VU, y sin perjuicio para la Seguridad, es la utilización de técnicas de monitoreo de condición (Mantenimiento Predictivo), cuya finalidad es impedir el correctivo de emergencia entre t_{MP} y VU (figura 2.2.7). En estos casos se debe evaluar técnicamente la viabilidad de la tarea *(Ver Mantenimiento Predictivo).*

VU habitualmente se obtiene de aplicar un factor de seguridad (de entre 3 y 4) de la media estadística de elementos idénticos ensayados. Se denomina **límite de vida segura** y es un criterio de diseño derivado del antiguo criterio de **límite de vida infinita**, ya en desuso.

√ Si la Falla imprevista únicamente tiene impacto económico

Muchas veces, la avería del equipo sólo encierra efectos económicos desfavorables. En estos casos, el beneficio del MP se debe evaluar desde un punto de vista puramente económico. Para el caso más general, el intervalo entre tareas preventivas de reemplazo o restauración será t_{MP} según figura 2.2.7. Aquí, t_{MP} siempre será menor a MTBF, y cuanto menor sea σ, menor será también la diferencia entre estos dos.

Lamentablemente es común comparar simplemente el costo unitario de la tarea preventiva con el costo que le significa a la organización afrontar una parada imprevista de un equipo. Esto es válido únicamente cuando t_{MP} tiende a MTBF, vale decir, cuando σ tiende a cero. Lo cierto es que, aún con baja dispersión, $\Delta(t_{MP}$ - MTBF) obliga en general a realizar una evaluación económica a lo largo de un horizonte de validez.

A continuación, las variables utilizadas para la validación del intervalo t_{MP}.

---

1 Ver RCMII Reliability Centred Maintenance de John Moubray - Aladon LLC[2004], página 136.

H: Horizonte de análisis. Seleccionar un intervalo lo suficientemente representativo a lo largo del cual se asume que el activo será utilizado en un contexto operativo sin variación. Existen varios métodos para estimar H. En ocasiones se conoce el momento a partir del cual se prescindirá del servicio del equipo por cuestiones operativas, de desgaste, mercado, uso, cambios tecnológicos, etc. Otras veces puede utilizarse el período de amortización contable, momento en que podrá reemplazarse por obsolescencia tecnológica.

De todas maneras no deja de ser una estimación y cuando no se disponga de otra información, se considera apropiado tomar entre 4 y 5 veces el intervalo t_{MP}.

MTBF: Tiempo medio entre fallas sin MP, o frecuencia promedio de aparición de las fallas o defectos bajo correctivo.

C_f: Costo unitario de la falla sin MP. Es un valor de mucha importancia (tener en cuenta los factores que lo constituyen).

C_{rp}: Costo de la tarea de MP. Debe incluir los repuestos, materiales, insumos, mano de obra, contrataciones, servicios de terceros, etc. necesarios para efectuar el trabajo de sustitución o restauración.

C_{bm}: Costo ó pérdida de beneficio marginal. Es el factor que requiere la mayor atención. En muchas ocasiones se cae en la tentación de ponderar este valor simplemente como el producto del precio de venta y el volumen de producto no realizado a consecuencia de la falla imprevista. En realidad, puede suceder que la detención del activo no produzca consecuencias sobre la producción o las ventas, debido a que existen pulmones o reservas suficientes y que, luego de reparado, el sistema está en condiciones de recuperar dicho volumen de trabajo o servicio. C_{bm} también será despreciable cuando existan equipos capaces de suplir al que falló con redundancias pasivas o stand-by.

C_{ad}: Se trata de los gastos adicionales que sobre el activo se generan como consecuencia de la rotura imprevista. Los efectos de una falla sorpresiva, además de afectar la producción o las ventas, puede tener consecuencias económicas sobre el propio activo al que pertenece el componente dañado. Su rotura inesperada puede transmitirse a otras partes que también requieran reparación generando un consumo adicional en repuestos o mano de obra.

C_{mp}: Costo unitario de la intervención preventiva (tener en cuenta los factores que lo constituyen).

C_{bmp}: Generalmente las tareas de MP se programan y planifican en función de los *baches* de producción y no impactan sobre los beneficios de la compañía. Sin embargo, en algunas oportunidades la demanda de producción es tal, que la realización de una parada técnica por MP conlleva pérdidas de beneficios (impacto en la disponibilidad). Por ejemplo, C_{bmp} será mayor que cero cuando el sistema completo se encuentre a máxima capacidad y la demanda sea tal que una parada disminuya el volumen de ventas (alta demanda). Una situación similar se presenta cuando es necesario cumplir con la rutina de MP fuera del horario normal de trabajo, lo que obliga a pagar horas extras al personal especialista. El gasto adicional que esto genera, será parte del costo total por MP.

C_{Tf}: Costo total sin MP a lo largo del periodo de análisis H.

C_{Tmp}: Costo total con MP durante el periodo de análisis H.

El costo unitario queda establecido por:

$$C_{mp} = C_{rp} + C_{bmp} \tag{2.2.2}$$

y el costo unitario sin mantenimiento preventivo,

$$C_f = C_{rp} + C_{bm} + C_{ad} \tag{2.2.3}$$

De esta forma, el costo total con MP y sin él queda expresado respectivamente por:

$$C_{Tmp} = \frac{H \times (C_{rp} + C_{bmp})}{t_{MP}} \tag{2.2.4}$$

$$C_{Tf} = \frac{H \times (C_{rp} + C_{bm} + C_{ad})}{MTBF} \qquad (2.2.5)$$

El objetivo es comparar los valores de C_{Tf} y C_{Tmp}. Si las estimaciones son correctas, se deberá tomar el menor costo total. Estos cálculos se basan en aproximaciones, pero son de gran utilidad para evaluar situaciones en las que naturalmente se habría tomado la decisión de programar tareas de MP, sin un análisis previo de costo-beneficio a lo largo de H.

Conforme la dispersión (σ) aumenta, puede observarse en las ecuaciones anteriores que no resultará beneficioso realizar tareas de mantenimiento preventivo. Vemos en la ecuación 2.2.4 que cuando t_{MP} disminuye, C_{Tmp} aumenta hasta resultar más costoso que C_{Tf}.

Si se escoge la opción de realizar mantenimiento preventivo porque $C_{Tmp} < C_{Tf}$, no deberían surgir fallas antes de t_{MP} debido a la distribución normal. Las que surjan, serán consecuencia de la aparición de otro modo de falla ajeno al periodo posterior a t_{MP}. Por el contrario, si la elección adoptada es no realizar la tarea preventiva porque $C_{Tf} < C_{Tmp}$, entonces la organización deberá asumir la convivencia con la falla a intervalos promedio MTBF.

Dos aspectos serán los responsables de que la situación anterior se invierta. Uno es el contexto operativo. El otro, que se pueda ajustar o minimizar la dispersión de las fallas.

Para el caso particular en que $C_{bm} = C_{bmp} = 0$, igualmente se tendrá que evaluar la relación entre C_{Tmp} y C_{Tf}. En principio pareciera que los dos costos totales son iguales, en realidad puede suceder que C_{ad} sea lo suficientemente grande como para justificar de todas maneras la rutina preventiva programada.

Si el costo C_{Tmp} es mayor que C_{Tf}, no se debería realizar ninguna tarea de recambio o reparación programada para el modo de falla analizado, a excepción de las rutinas básicas de limpieza, lubricación, ajustes o chequeos de recorrida (por su bajo costo frente al alto beneficio).

Dado que este análisis comparativo se basa en aproximaciones, se recomienda la opción de realizar Mantenimiento Preventivo a menos que $C_{Tmp} > 1{,}1 \times C_{Tf}$. Este factor de ajuste o seguridad podrá variarse en función de la situación particular de cada caso.

Ejemplo 2.2.2

Una máquina posee un rodillo de imprimación de adhesivo cuyo modo de falla dominante es *"desgaste de su superficie de contacto con el producto"*. Cuando la superficie se encuentra con alto nivel de deterioro, el agregado de adhesivo resulta insuficiente lo que provoca pérdidas por desechos de producción.

La identificación del desvío en los rodillos de encolado es evidente al menos una vez por turno, dado que ese es el intervalo de toma de muestras efectuado por el departamento de calidad. Esto lleva a que, en el peor de los casos, se deba perder la producción completa de un turno de 8 horas de etiquetado.La condición más desfavorable (materiales e insumos por 8 horas) no afecta las ventas debido al nivel de pre-stock elaborado y a que la velocidad de la máquina permite recuperar el volumen de producción perdido en el próximo turno. La pérdida en materiales e insumos estimada (para 8 horas de producción) es de $ 7.200.

Se sabe que los rodillos de este tipo, en la máquina referida, nunca dejan de aportar correctamente el adhesivo antes de los 6 meses de funcionamiento continuo. Además, de lo comentado por el proveedor de los rodillos, se pudo realizar la comprobación empírica en la Planta de Etiquetado.

Sin embargo, un estudio estadístico sobre 500 rodillos realizado hace unos años, arrojó que el MTBF para el modo de falla indicado es 12 meses.

Si la tarea de mantenimiento preventivo le cuesta a la compañía un total de $ 1.340 cada 6 meses, y puede planificarse en los turnos de baja producción, calcular si la misma resultará conveniente cuando hayan transcurrido 4 años de operación.

H = 4 años = 48 meses

C_{Tmp} = 48 meses x ($ 1.340 + 0) / 6 meses = **$ 10.720**

C_{Tf} = 48 meses x ($ 1.340 + $ 7.200) / 12 meses = **$ 34.160**

Esto demuestra la conveniencia de realizar la tarea de MP.

Ejemplo 2.2.3
Sea el mismo ejemplo anterior, sólo que ahora el departamento de calidad realiza los controles a intervalos de 1 hora. Así, la consecuencia del modo de falla puede ser identificada, en el peor de los casos, una hora después de sucedido.

C_{bm} = \$ 7.200 / 8 = \$ 900

C_{Tmp} = 48 meses x (\$ 1.340 + 0) / 6 meses = **\$ 10.720**

C_{Tf} = 48 meses x (\$ 1.340 + \$ 900) / 12 meses = **\$ 8.960**

Para este caso, y asumiendo que el tiempo de reemplazo de los rodillos ante una falla imprevista es breve y no afecta la producción más que en los \$ 900, no será conveniente la sustitución periódica cada 6 meses. Tendrá más beneficio económico aprovechar la vida remanente que pueda obtenerse de algunos rodillos para tiempos superiores a los 6 meses.

Ejemplo 2.2.4
Mismo caso anterior, pero luego de grandes esfuerzos en conjunto con el proveedor de los rodillos se logró que no sucedan fallas antes de los 11 meses. Calcular nuevamente la conveniencia de aplicar mantenimiento preventivo.

H = 4 años = 48 meses

C_{Tmp} = 48 meses x (\$ 1.340 + 0) / 11 meses = **\$ 5.847**

C_{Tf} = 48 meses x (\$ 1.340 + \$ 900) / 12 meses = **\$ 8.960**

Vuelve a resultar conveniente realizar la tarea de MP. Obsérvese la importancia que toma, en las ecuaciones, la dispersión de las fallas. A medida que la dispersión disminuye, más probable es justificar el mantenimiento preventivo.

Cabe aclarar por último que el Mantenimiento Preventivo con recambio persigue transformar la tasa de fallas creciente del equipo en una ley de distribución de fallas exponencial[1], si el proceso se analiza durante un intervalo H = n.t_{MP}.

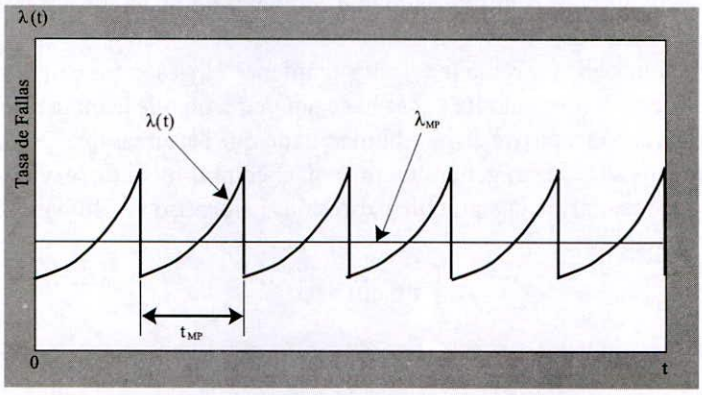


Figura 2.2.8 Tasa de fallas promedio como consecuencia del mantenimiento preventivo[1].

Dicho esto, se está en condiciones de asegurar que la probabilidad de que suceda una falla con aplicación de MP (durante H = n.t_{MP}) se aproxima a $\lambda_m \cong$ cte.

El riesgo debe estar claramente conocido por todos los integrantes del grupo de trabajo y por la organización, dado que asume la posibilidad de tener que efectuar, en alguna oportunidad, alguna **Acción Reactiva** de mantenimiento *(Mantenimiento Correctivo)*.

---

1 Introducción al Proyecto de Ingeniería[2003]. Enrique Villamil García y Miguel J. García Hernández, página 159.

Habitualmente se cree que el hecho de reemplazar o restaurar ítems elimina toda posibilidad de que ocurra una falla anticipadamente. Esto no es cierto, salvo en los casos para los que la tasa de fallas antes de t_{MP} es cero y el único modo de falla capaz de suceder es el dominante analizado. Cuanto menor sea el riesgo asumido, más pequeño será el tiempo entre intervenciones preventivas, hasta un determinado punto en que ya no será conveniente reducir t_{MP}.

Es frecuente mencionar al *tiempo* como variable para definir los intervalos teóricos de intervención preventiva controlada. En realidad puede ser cualquier otra; horas de marcha, ciclos de funcionamiento, cantidad de volumen producido, kilómetros, cantidad de aterrizajes, etc.

√ Riesgo Preventivo

En algunas situaciones se pretende estimar el intervalo entre tareas, asumiendo cierto nivel de riesgo para optimizar la gestión preventiva. Esto obliga a montarse en la campana de Gauss.

El riesgo preventivo (αp), para el modo de falla analizado, es la probabilidad de que ocurra una falla en el intervalo $[0, t_{ap}]$, figura 2.2.9 donde $t_1 < t_{ap}$. El tiempo t_1 es el intervalo entre reemplazos sin asumir riesgos, mientras t_{ap} es aquel para el que se asume una probabilidad de enfrentarse al **Mantenimiento Correctivo.**

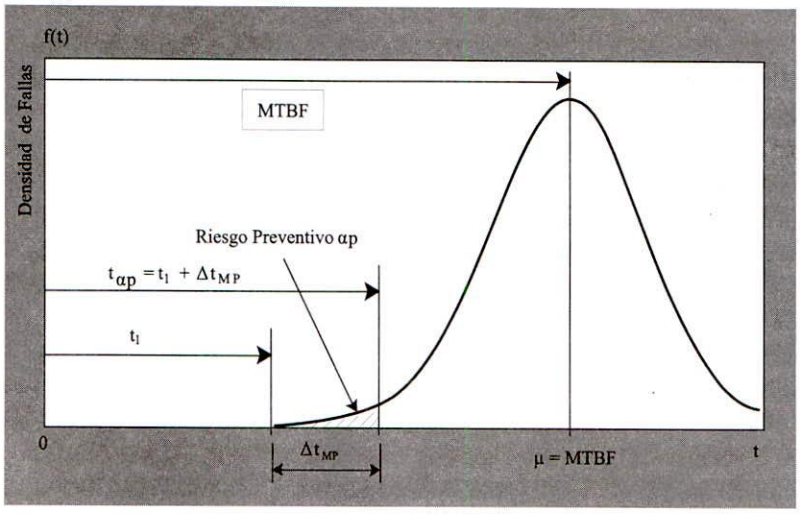


Figura 2.2.9 Aumento de t_{MP} con la incorporación de Riesgo Preventivo αp.

Cuando la dispersión en muy grande, el riesgo preventivo (αp) es alto y obliga a reducir t_{ap} pudiéndose convertir en no rentable el preventivo, dado que comienza a impactar fuertemente en disponibilidad. El proceso sería el siguiente.

Una elevada dispersión obliga a reducir t_{ap} para mantener al riesgo preventivo (αp) dentro de los límites de tolerancia. Luego, el intervalo $[0; t_{ap}]$ se hace tan pequeño que la meta de disponibilidad no se cumpliría. Introducimos el concepto de disponibilidad dado que las tareas de MP reducen efectivamente la disponibilidad porque se realizan generalmente con el equipo fuera de servicio.

El valor de t_{ap} puede resultar de la siguiente expresión. Es preciso el uso de tablas de probabilidad normal, o bien aproximaciones.

$$\int_0^{t_{\alpha p}} f(t)\, d(t) = \alpha p \qquad (2.2.6)$$

Una vez adoptado el valor de riesgo preventivo (αp), el trabajo deberá realizarse a intervalos fijos t_{ap}.

$$t_{MP} = t_{ap} \qquad (2.2.7)$$

Si t_{MP} está montado dentro de la campana de Gauss, existe una probabilidad acumulada dada por el área bajo la curva de f(t), que aporta una cuota de riesgo de que sucedan fallas imprevistas.

Cuando únicamente es necesario estimar consecuencias económicas, la situación es similar a la desarrollada por la ecuación 2.2.2 sólo que considerando el riesgo preventivo αp.

$$C_{mp} = (C_{rp} + C_{bmp}) + C_f \times \alpha p \tag{2.2.8}$$

$$C_{Tmp} = \frac{H \times [(C_{rp} + C_{bmp}) + C_f \times \alpha p]}{t_{ap}} \tag{2.2.9}$$

La ecuación 2.2.9 debe compararse con 2.2.5 para determinar el beneficio de la tarea.

Ejemplo 2.2.5

Un centro de distribución de productos alimenticios cuenta con una flota de 20 vehículos utilitarios. La flota es nueva y cada unidad tiene un grado de utilización de 160.000 km/año aproximadamente. El fabricante sugiere el reemplazo periódicos de las correas de distribución de los motores cada 60.000 km, lo que tiene un costo total C_{rp} de $ 450 para cada unidad.

La rotura de una correa de manera inesperada le significa a la compañía un gasto operativo adicional de $ 600 en concepto de alquiler de vehículos y de poder cumplir con las entregas a tiempo y no recibir quejas de los clientes. Esta reparación lleva dos días y la falla, además, puede generar roturas adicionales en el motor, lo que incrementaría el gasto de la reparación en $ 1.560.

Siendo que los vehículos funcionan en dos turnos de 8 horas de lunes a sábado, es posible programar el tiempo de 4 horas que el taller demora en realizar la tarea de reemplazo de cada correa. Cuando la demanda de entregas es muy alta, hay que contratar vehículos de alquiler para reemplazar la función.

Dado el crecimiento en los gastos de operación durante el último tiempo, se le ha pedido al departamento de mantenimiento que optimice el gasto del parque. A consecuencia, y luego de varias acciones de investigación y recolección de datos, se logró constituir una tabla como la ilustrada a continuación con la distribución de fallas imprevistas por rotura de correas para un total de 235 vehículos similares.

Km	Fallos
35.000	0
40.000	0
45.000	0
50.000	0
55.000	0
60.000	0
65.000	1
70.000	1
75.000	1
80.000	2
85.000	50
90.000	100
95.000	50
100.000	20
105.000	5
110.000	2
115.000	1
120.000	1
125.000	1
130.000	0
135.000	0
140.000	0
145.000	0
150.000	0
Total	**235**

Tabla 2.2.1 Distribución de fallas "rotura de correas de distribución" para un total de 235 vehículos.

A los responsables de mantenimiento se les pide:

a) Graficar la curva f(km) en función de los kilómetros para la distribución mostrada en la tabla anterior.

b) Determinar si es conveniente realizar la tarea de mantenimiento preventivo como sugiere el fabricante para un periodo de dos años, calculando el costo que significa la tarea de sustitución programada (C_{mp}) y el costo del correctivo (C_f) si nada se hiciese durante el mismo intervalo de tiempo.

c) Realizar una tabla donde se muestre el costo de la tarea preventiva para diferentes intervalos de sustitución, partiendo de los 45.000 km, con intervalos de 5.000, y llegando a los 100.000 km. Tener en cuenta que para calcular el costo de la sustitución programada, se debe estimar el costo inherente al riesgo asumido por cada 5.000 km que se aumenta la periodicidad de reemplazo, de acuerdo a la distribución mostrada en la tabla de fallas.
d) Graficar el ahorro generado para cada intervalo de 5.000 km con respecto al reemplazo sugerido por el fabricante.
e)Determinar los kilómetros a los cuales se deberían cambiar las correas para generar el máximo ahorro, y cuál sería el valor de dicho ahorro para el parque de 20 unidades al cabo de los 2 años.

a) La curva de distribución de fallas, en función de los kilómetros, se aprecia en la figura 2.2.10.

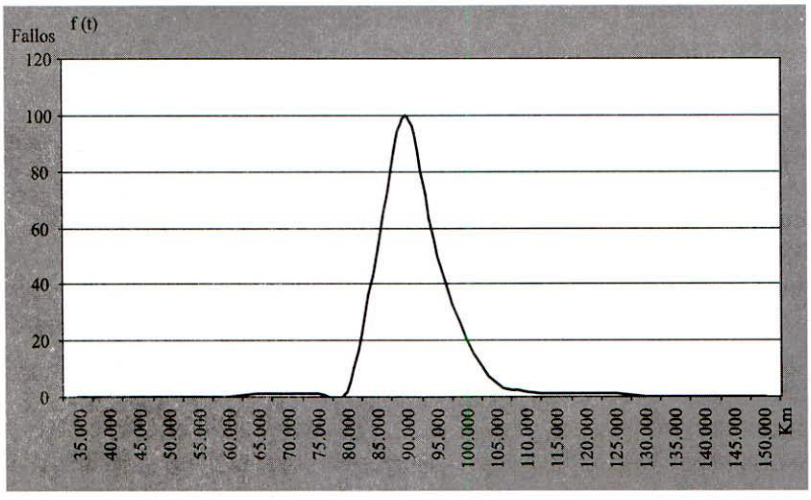


Figura 2.2.10 Distribución de fallas para los datos de Tabla 2.2.1.

b) H = 2 x 160.000 km = 320.000 Km

Aplicando 2.2.4 y 2.2.5, se tiene:

C_{Tmp} = 320.000 km x ($ 450 + 0) / 60.000 km = **$ 2.400**

El MTBF surge de la siguiente tabla y es:

MTBF = 21.475.000 / 235 = **91.383 km.**

Tabla 2.2.2 Cálculo del MTBF y de la probabilidad de falla imprevista en función de los kilómetros.

Km	Fallos	Km x Fallos	αp
35.000	0	0	0,00%
40.000	0	0	0,00%
45.000	0	0	0,00%
50.000	0	0	0,00%
55.000	0	0	0,00%
60.000	0	0	0,00%
65.000	1	65.000	0,43%
70.000	1	70.000	0,85%
75.000	1	75.000	1,28%
80.000	2	160.000	2,13%
85.000	50	4.250.000	23,40%
90.000	100	9.000.000	65,96%
95.000	50	4.750.000	87,23%
100.000	20	2.000.000	95,74%
105.000	5	525.000	97,87%
110.000	2	220.000	98,72%
115.000	1	115.000	99,15%
120.000	1	120.000	99,57%
125.000	1	125.000	100,00%
130.000	0	0	100,00%
135.000	0	0	100,00%
140.000	0	0	100,00%
145.000	0	0	100,00%
150.000	0	0	100,00%
Total	**235**	**21.475.000**	

C_{Tf} = 320.000 km x ($ 450 + $ 600 + $ 1.560) / 91.383 km = **$ 9.139**

Comparando C_{mp} y C_f, surge que es más conveniente realizar la tarea de sustitución de las correas de distribución cada 60.000 km.

c) El costo de la tarea de mantenimiento con riesgo preventivo (αp) para, por ejemplo, 75.000 km surge de aplicar la ecuación 2.2.9. Antes debe estimarse el riesgo que surge de llevar el cambio de correas a los 75.000 km. La tabla 2.2.2 muestra que la probabilidad de que ocurra una falla imprevista habiendo transcurrido 75.000 km, es de 3 en 235; esto es, 1,28%.

Así, aplicando la ecuación 2.2.9, se tiene:

C_{Tmp} = 320.000 km x [($ 450 + ($ 450 + $ 600 + $ 1.560) x 0,0128)] / 75.000 km = **$ 2.062**

C_{Tmp} c/riesgo = **$ 2.062** para cada vehículo.

Realizando la misma estimación para el entorno 45.000 km – 100.000 km resulta la siguiente tabla.

Horizonte H	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000
MTBF	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383
t_{MP}	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000
t_{MPr}	45.000	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000	75.000	80.000	85.000	90.000	95.000	100.000
C_{rp}	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450
C_{bmp}	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0
C_{bm}	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600
C_{ad}	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560
C_{Tf}	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140	$ 9.140
$C_{TMP\ s/riesgo}$	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400	$ 2.400
$C_{TMP\ c/riesgo}$	$ 3.200	$ 2.880	$ 2.618	$ 2.400	$ 2.270	$ 2.159	$ 2.062	$ 2.022	$ 3.994	$ 7.721	$ 9.185	$ 9.437
$A._{s/Riesgo}$	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740	$ 6.740
$A._{c/Riesgo}$	$ 5.940	$ 6.260	$ 6.521	$ 6.740	$ 6.869	$ 6.981	$ 7.077	$ 7.117	$ 5.146	$ 1.419	-$ 45	-$ 297
Δ_{Ahorro}	-$ 800	-$ 480	-$ 218	$ 0	$ 130	$ 241	$ 338	$ 378	-$ 1.594	-$ 5.321	-$ 6.785	-$ 7.037
$\Delta_{Ahorro\ TOTAL\ [20\ Unidades]}$	-$ 16.000	-$ 9.600	-$ 4.364	$ 0	$ 2.599	$ 4.826	$ 6.757	$ 7.557	-$ 31.876	-$ 106.417	-$ 135.701	-$ 140.732

Tabla 2.2.3
Ahorro por Mantenimiento Preventivo con riesgo para diferentes valores de t_{ap}

d) Tomando los valores de la tabla 2.2.3, se grafica el ahorro según la variación de t_{ap} comparado con el costo preventivo sugerido por el fabricante de los vehículos ($ 2.400).

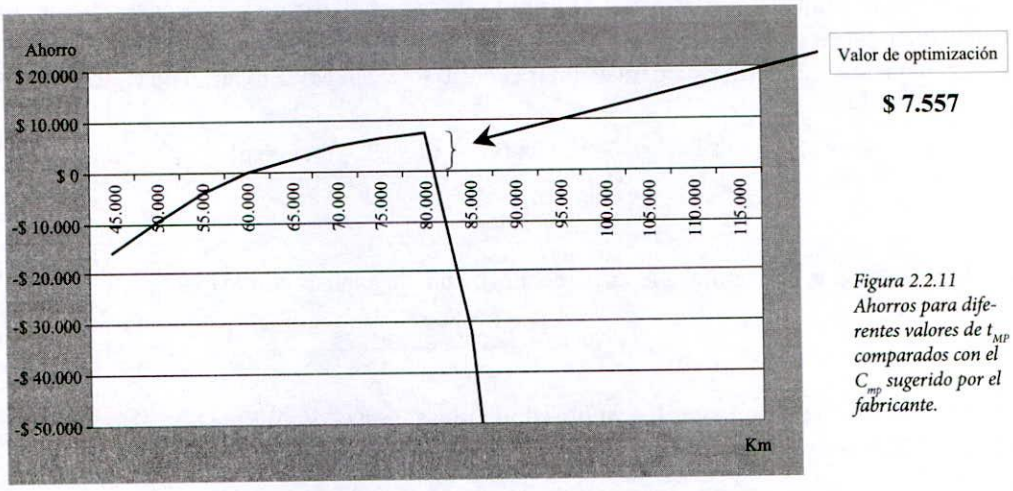


Figura 2.2.11
Ahorros para diferentes valores de t_{MP} comparados con el C_{mp} sugerido por el fabricante.

e) El mayor ahorro se logra realizando el cambio de las correas a los 80.000 km. Esto representa un total aproximado de $ 378 por unidad. Para las 20 unidades el ahorro esperado es de **$ 7.557**.

√ Mantenimiento Preventivo con Mortalidad Infantil

Si por caso la acción preventiva tiene alguna probabilidad de provocar la falla que justamente persigue evitar, habrá una disminución en la confiabilidad del componente entre $[0, t_{ap}]$ y se deberá tener en cuenta al implementar una rutina de mantenimiento preventivo. Esta situación se conoce como Mantenimiento Preventivo Imperfecto[1], y su consecuencia es el aumento del riesgo total preventivo (αT), dado por 2.2.10, entre 0 y t_{ap}.

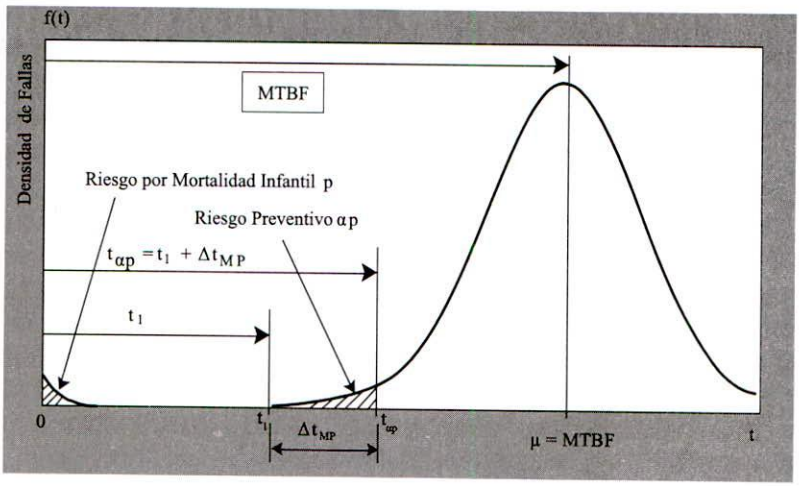


Figura 2.2.12. Riesgo inicial p, provocado por el periodo de Mortalidad Infantil (MI).

$$\alpha T = \alpha p + p \qquad (2.2.10)$$

El riesgo preventivo para un modo de falla cuya distribución es normal, es el área bajo la curva de f(t) entre 0 y t_{ap}. Siendo $t\alpha p = t_1 + \Delta t_{MP}$ el nuevo tiempo entre dos intervenciones preventivas.

Si p es la probabilidad de que ocurra una falla como consecuencia de la intervención (un modo de falla distinto al anterior), disminuir la periodicidad t_1 no tendrá ningún efecto sobre p. Si p, por sí solo, es lo suficientemente grande como para superar el valor de riesgo total preventivo tolerado (αT), la tarea no es recomendable técnicamente. Para estos casos, se deberán instrumentar rutinas de chequeo antes del montaje o fabricación, o de verificación de arranque previo a la puesta en servicio.

La única manera de disminuir p es a través del aseguramiento en la calidad del "arranque". Si esto no se alcanza, la tarea de sustitución periódica no es recomendable si el riesgo puede afectar la seguridad. Es importante reiterar que el modo de falla, cuya probabilidad de ocurrencia es p, no es el que produce la distribución normal a partir de t_1. El modo de falla a partir de t_1 es, generalmente, intrínseco del componente reemplazado o reparado.

La ecuación 2.2.5 utilizada para estimar el costo total sin MP a lo largo de H, toma la forma:

$$C_{Tf} = \frac{H \times (C_{rp} + C_{bm} + C_{ad}) \times (1+ p)}{MTBF} \qquad (2.2.11)$$

Por su parte, el costo total a lo largo del horizonte de análisis con MP, será:

$$C_{Tmp} = \frac{H \times [C_{rp} + C_{bmp} + C_f \times (\alpha p + p)}{t_{ap}} \qquad (2.2.12)$$

Se trata ahora de comparar los valores obtenidos de estas dos últimas ecuaciones, para luego seleccionar el más conveniente.

---

1 Introducción al Proyecto de Ingeniería 2003. Enrique Villamil García y Miguel J. García Hernández, página 160.

Ejemplo 2.2.6

Supóngase que en el ejercicio anterior se sabe que, de las 235 correas, en 6 ocasiones, y a causa de los trabajos de instalación, se han presentado fallas prematuras en otras partes del motor (no en las correas), dejando a los vehículos fuera de servicio. Efectuar nuevamente todas las estimaciones solicitadas con anterioridad.

a) La curva de distribución de fallas es la misma que la graficada en la figura 2.2.10, dado que el modo de falla que se presenta en los trabajos de montaje no es debido a defectos en las correas. Para las correas se asume $\lambda=0$ cuando el rodaje está por debajo de los 60.000 km.

b) H = 2 x 160.000 km = 320.000 Km

MTBF = 21.475.000 / 235 = 91.383 Km

p = 6/235 = 0,0255

Aplicando 2.2.12, se tiene:

C_{Tmp} = 320.000 km x [$ 450 + 0 + ($ 450 + $ 600 + $ 1.560) x (0 + 0,0255)] / 60.000 km

C_{Tmp} = **$ 2.755**

Luego, con 2.2.11 se tiene:

C_{Tf} = 320.000 km x [($ 450 + $ 600 + $ 1.560) x (1 + 0,0255)] / 91.383 km = **$ 9.373**

Comparando C_{mp} y C_f surge, al igual que en el ejercicio anterior, que es más conveniente realizar la tarea de sustitución de las correas. De todas maneras nótese que el costo total con MP para recambios sistemáticos cada 60.000 km se elevó de $ 2.400 a $ 2.755, debido al riesgo que aportan los fallos por mortalidad infantil.

c) El costo de la tarea de mantenimiento con riesgo total preventivo (α_T) para los 75.000 km, surge de aplicar la ecuación 2.2.12.

C_{Tmp} = 320.000 km x [($ 450 + 0 + ($ 450 + $ 600 + $ 1.560) x (0,0128 + 0,0255)] / 75.000 km

C_{Tmp} = **$ 2.346**

$C_{Tmp\ c/riesgo}$ = **$ 2.346** para cada vehículo.

Realizando la misma operación para el entorno 45.000 km – 100.000 km se tiene:

Horizonte H	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000	160.000
MTBF	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383	91.383
t_{MP}	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000
t_{MPr}	35.000	40.000	45.000	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000	75.000	80.000	85.000	90.000	95.000	100.000
C_{rp}	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450	$ 450
C_{bmp}	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0
C_{bm}	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600	$ 600
C_{ad}	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560	$ 1.560
C_{Tf}	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373	$ 9.373
$C_{TMP\ s/riesgo}$	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755	$ 2.755
$C_{TMP\ c/riesgo}$	$ 4.724	$ 4.133	$ 3.674	$ 3.306	$ 3.006	$ 2.755	$ 2.598	$ 2.463	$ 2.346	$ 2.289	$ 4.245	$ 7.958	$ 9.410	$ 9.650
$A_{-s/Riesgo}$	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618	$ 6.618
$A_{-c/Riesgo}$	$ 4.649	$ 5.240	$ 5.699	$ 6.066	$ 6.367	$ 6.618	$ 6.775	$ 6.910	$ 7.026	$ 7.084	$ 5.128	$ 1.415	-$ 37	-$ 277
Δ_{Ahorro}	-$ 1.968	-$ 1.378	-$ 918	-$ 551	-$ 250	$ 0	$ 157	$ 292	$ 409	$ 467	-$ 1.489	-$ 5.202	-$ 6.654	-$ 6.894
$\Delta_{Ahorro\ TOTAL}$ [20 Unidades]	-$ 39.363	-$ 27.554	-$ 18.369	-$ 11.022	-$ 5.010	$ 0	$ 3.146	$ 5.842	$ 8.178	$ 9.334	-$ 29.785	-$ 104.048	-$ 133.082	-$ 137.889

Tabla 2.2.4
Ahorro por Mantenimiento Preventivo con riesgo total para diferentes valores de t_{ap}.

d) La figura 2.2.13 grafica la curva de ahorro con riesgo total preventivo según la variación de t_{ap} comparado con el costo total preventivo con riesgo por mortalidad infantil sugerido por el fabricante de los vehículos ($ 2.755).

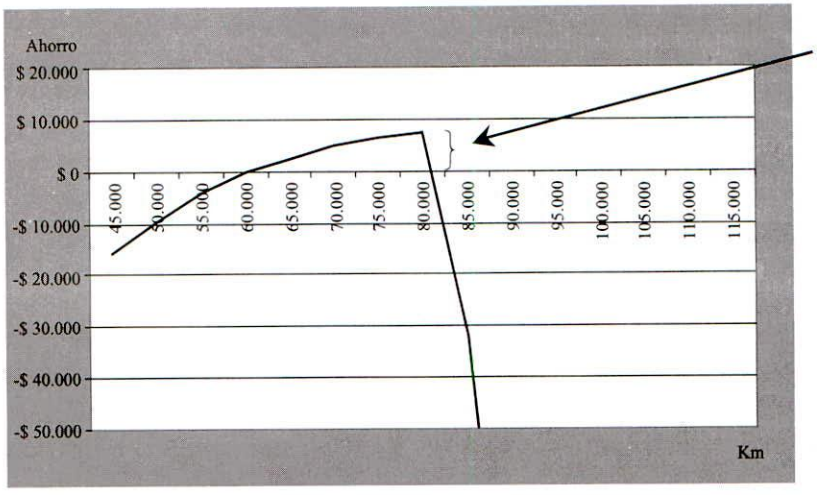


Figura 2.2.13 Ahorros con riesgo total para diferentes valores de t_{MP} comparados con el C_{mp} sugerido por el fabricante con riesgo por mortalidad infantil.

e) El mayor ahorro se logra nuevamente realizando el cambio de las correas a los 80.000 km. Esto representa un total aproximado de $ 467 por unidad. Para las 20 unidades el ahorro esperado a lo largo de los 320.000 km es de **$ 9.334.**

Nota: Los ejemplos anteriores son meramente ilustrativos y tienen como finalidad sólo mostrar la metodología para estimar frecuencias de intervención. No deben ser utilizados para resolver situaciones particulares de otros equipos, sin antes verificar su validez en la práctica.

Se pueden resumir las acciones para determinar la conveniencia técnica y económica del reemplazo o restauración sistemática de componentes, en los siguientes pasos:

- √ Determinar si la consecuencia de la falla, producida por el modo de falla estudiado, tiene impacto en la seguridad. En caso afirmativo estimar VU con 2.2.1.
- √ Si la falla no tiene efectos sobre la seguridad y la dispersión (σ) es baja, aplicar 2.2.4 y 2.2.5. Establecer un horizonte de análisis válido y seleccionar la opción más conveniente.
- √ Si la falla no tiene efectos en la seguridad y su dispersión (σ) se conoce y es importante, cuantificar el valor del riesgo preventivo (αp) para diferentes valores del intervalo. De acuerdo a estas estimaciones, definir si es conveniente asumir los riesgos o redefinir un nuevo intervalo t_{ap}. Obtener el punto del intervalo que entrega el mayor beneficio total.
- √ Analizar si es posible que suceda un modo de falla prematuro al realizar la tarea de reemplazo o restauración sistemática. Si existe y se puede estimar su valor p, evaluar la conveniencia de la tarea preventiva utilizando las ecuaciones 2.2.11 y 2.2.12. Obtener el punto del intervalo que ofrezca el mayor beneficio.
- √ En todos los casos, asegurar que la tarea de sustitución o restauración garantice la expectativa de riesgo preventivo tolerado, y no más.
- √ Implementar procesos de mejora con el fin de disminuir la dispersión de las fallas (t_{MP} debe tender a MTBF sin aumentar el riesgo preventivo αp). Cuanto menor sea esta diferencia, mayor será el beneficio por realizar tareas de MP a lo largo de H.
- √ Si no se lleva adelante el punto anterior, y se intenta aplicar mantenimiento preventivo en forma deliberada, resultará que: *Cuanto más se niegue una falla, más se terminará conviviendo con ella.*

2.2.3 Combinación de Tareas (para distintos modos de falla)

Los aspectos hasta aquí vistos abarcan el análisis para un único modo de falla de un mismo elemento. La realidad impone tener en cuenta varias fallas simultáneamente, cada una con su respectivo t_{MP}. Sucede que un ítem puede estar sujeto a más de un modo de falla o bien varios elementos sufrir el mismo fallo. Ambas situaciones hay que tenerlas en cuenta a la hora de confeccionar un Plan Integral de Mantenimiento Preventivo.

Un equipo o sistema podrá estar constituido por componentes cuyas periodicidades t_{MP} sean diferentes, por lo que hay que combinarlas, ajustarlas y agruparlas asegurando la mayor eficacia total de conjunto. Puede ocurrir que algunas partes sufran un sobre-mantenimiento mientras que otras sean sub-mantenidas.

Si se respetan exactamente todos los t_{MP} calculados individualmente, podrá caerse en una disminución significativa de la disponibilidad debido a la cantidad de detenciones necesarias. El trabajo de combinar tareas preventivas consiste en identificar aquellas frecuencias más cercanas a los múltiplos de otras tareas de mayor o menor periodicidad. Una vez individualizadas, se ajustan haciéndolas múltiplo de alguna otra, reduciendo así la cantidad de detenciones necesarias sobre el equipo. Para los casos en que el ajuste impone una disminución de la frecuencia, es necesario estimar el aumento del riesgo preventivo de la tarea ajustada. Si el riesgo se mantiene dentro del valor tolerado para las consecuencias del fallo, se podrá variar la frecuencia sin inconvenientes; caso contrario, se deberá buscar un múltiplo de una tarea de mayor frecuencia. Tener en cuenta, sin embargo, que esto únicamente es posible en la medida que un aumento de la frecuencia pueda justificarse económicamente.

A continuación se presenta un resumen de los puntos a considerar para combinar tareas.

1. Definir un periodo de análisis, generalmente cercano a la menor frecuencia.
2. Calcular la cantidad de veces que cada rutina se repite a lo largo del periodo definido en el punto anterior.
3. Ordenar las rutinas según el factor de repetición de mayor a menor.
4. Las tareas cuyas frecuencias tengan mayor repetición se tomarán como centrales.
5. Tomar una a una las tareas cuyas frecuencias tengan menor repetición y buscar el múltiplo más cercano a aquellas de mayor repetición.
6. Ajustar la frecuencia de la rutina analizada en el punto anterior, según el múltiplo escogido, y repetir todo el análisis.
7. Continuar la iteración hasta reducir a un valor aceptable la cantidad de intervenciones preventivas a lo largo de dicho periodo.
8. El límite de esta iteración lo da el aumento del riesgo preventivo y el costo total.

Reiteramos la necesidad de tener en cuenta el posible crecimiento del riesgo preventivo como consecuencia del ajuste de frecuencias.

El punto 4 no es mandatario en todos los casos, debido a que no siempre es conveniente tomar las tareas más reiterativas como centrales. Siempre se debe realizar un análisis integral para adoptar la mejor relación técnico-económica entre todas las tareas preventivas evaluando el riesgo que introduce la variación de los periodos t_{MP}.

En las tareas cuya finalidad sea evitar fallos con consecuencia en la seguridad, el ajuste hacia una periodicidad mayor es casi prohibitivo. Para los casos muy complejos (gran cantidad de rutinas y frecuencias muy variadas), el equilibrio se encuentra iterando con varias periodicidades y evaluando también técnica y económicamente la mejor relación de conjunto. Resulta de utilidad para esto, apoyarse en planillas de cálculo dinámicas que facilitan el trabajo de optimización realizando los cálculos en forma automática. Una vez determinado el patrón de comportamiento para cada ítem y modo de falla, según las ecuaciones vistas en los apartados anteriores, se puede variar cada período t_{MP} hasta obtener el menor costo integral. Vale aclarar que los ajustes finales de t_{MP} los debe realizar personal técnico especializado.

El menor costo total, con riesgo preventivo controlado, será la opción a elegir[1].

---

1 Ver Capítulo 8 "Administración y Programación del Mantenimiento".

El tiempo total de un Plan Integral Preventivo será la suma de los tiempos de cada operación. Las distribuciones que generalmente rigen este tipo de tareas, son la Lognormal y la de Weibull.

Ejemplo 2.2.7
Sea una cinta transportadora accionada a cadena por medio de un grupo moto-reductor. Se escogieron 6 tareas preventivas con sus frecuencias originales para sus componentes, según se ilustra en la tabla siguiente.

N°	Descripción	Frecuencia Original
1	Cambio de aceite en el reductor.	13 meses
2	Alineación y ajuste general del motoreductor.	8 meses
3	Cambio de rodamientos en los rodillos de transporte.	11 meses
4	Limpieza ventilador del motor.	6 meses
5	Cambio de ferodos y ajuste freno de motor.	12 meses
6	Tensado de cinta transportadora.	3 meses

Tabla 2.2.5
Frecuencias originales relacionadas al ejemplo 2.2.7.

Asúmase que el régimen de marcha permite expresar las frecuencias en forma calendaria.

La situación mostrada en la tabla 2.2.5 obliga a detener el sistema de transporte a los 3, 6, 8, 9, 11, 12 y 13 meses.

Simplemente ajustando las frecuencias de las tareas 1, 2, y 3 resulta lo siguiente.

N°	Descripción	Frecuencia Ajustada
1	Cambio de aceite en reductor.	12 meses
2	Alineación y ajuste general del motoreductor.	6 meses
3	Cambio de rodamiento en rodillos de transporte.	12 meses
4	Limpieza ventilador del motor.	6 meses
5	Cambio de ferodos y ajuste freno de motor.	12 meses
6	Tensado de cinta trasportadora.	3 meses

Tabla 2.2.6
Frecuencias ajustadas para el ejemplo anterior.

Ahora solamente será necesario detener la marcha del transporte a los 3, 6, 9 y 12 meses; vale decir, 4 veces al año. Estos ajustes permiten estandarizar las rutinas de mantenimiento facilitando la programación y planificación. Téngase en cuenta que en el análisis anterior se considera despreciable el impacto económico producido al aumentar la frecuencia de las tareas 1 y 2. De la misma manera no se tuvo en cuenta el riesgo preventivo al disminuir la frecuencia de la tarea 3. En algunas aplicaciones estos factores deben considerarse cuando se ajusta periodicidad.

El ejemplo anterior es sencillo pero ayuda a entender el concepto de agrupación y planificación. La Programación Integral de tareas se aborda con profundidad en el Capítulo 8.

2.3 Mantenimiento de Rutina - Chequeos de Recorrida

Grandes beneficios con bajo costo

Un plan de mantenimiento preventivo no solamente contempla el reemplazo o restauración sistemática de partes, sino que también incluye *rutinas de inspección* o *chequeos de recorrida*. Se trata de un servicio caracterizado por la alta periodicidad y la corta duración, normalmente utilizando los sentidos humanos y sin ocasionar la indisponibilidad del equipo. Su finalidad es identificar defectos o anomalías evidentes como vibración, suciedad, pérdidas, ruidos, variables de proceso fuera de estado, etc. En algunas oportunidades lo realizan los propios operadores de la máquina (mantenimiento autónomo), a partir de la transferencia y programación desarrollada por el departamento de Mantenimiento. Esto debe alinearse con un plan de capacitación, desarrollo y control permanente. Debido a su corta duración exige controles simplificados, y su procesamiento ofrece una gran contribución al diagnóstico del estado de los equipos y a la conservación de su condición básica de funcionamiento.

También conocidas como **inspecciones rutinarias,** se llevan a cabo en lapsos de tiempo determinados, diseñando y analizando detenidamente los aspectos técnicos a verificar, las condiciones prácticas de aplicación y la seguridad del personal involucrado. Se busca el máximo beneficio con la menor complejidad técnica.

Hay que tener presente que por lo general realizan estas tareas personal operativo con bajo grado de especialización, por lo que la transferencia debe ser progresiva. Es preciso detallar claramente cuáles son los desvíos específicos a controlar y cómo actuar ante su hallazgo.

Una Hoja de Ruta de Inspección debe especificar claramente cada punto y contar con una descripción de fácil comprensión. Además, deberá indicar las variables a monitorear, el desvío esperado, la frecuencia de realización y cómo actuar en caso de encontrar dicha variable fuera de su estado satisfactorio. Todo el material de trabajo como planillas, documentación, fotografías, etc; es preciso que se encuentre soportado con documentación y registros de base. Se ha demostrado que la realización de estas rutinas, así como la lubricación, es rentable. Las recorridas visuales cuestan poco dinero, en comparación con su alto beneficio.

El proceso de Gestión de Mantenimiento debe administrar la información obtenida de estos chequeos. Ante la detección de un defecto (falla sintomática), el mismo se canaliza a través de los procedimientos implementados para su tratamiento. En muchas ocasiones, como resultado de una Hoja de Ruta de Inspección, se emiten Órdenes de Trabajo (OT_r) de carácter restaurativo o correctivo en el soporte informático. Otras veces, será necesario un rediseño físico u operativo[1].

2.3.1 Rutinas de Inspección

Las **rutinas de inspección** pueden dividirse en dos grupos, de acuerdo al estado de marcha del activo.

Rutinas de Inspección Estáticas (RIE)

Consisten en chequear visualmente los equipos fuera de la operación normal, y que no necesariamente supone el desarme de componentes. Es una inspección general y de comprobación. Se hacen antes de cada puesta en marcha o en algún otro momento que la operación lo permita sin afectar el proceso productivo. Las personas que las realizan deben contar con un alto grado de sensibilidad técnica.

Antes de implementar rutinas estáticas que obliguen interrumpir el proceso productivo, se debe analizar la factibilidad técnica de realizar rutinas de inspección dinámicas, o cualquier otra técnica de monitoreo de condición. Tener presente que si es preciso detener el proceso para realizar rutinas de inspección estáticas, el costo de éstas se incrementa dado que $C_{bmp} \neq 0$ [2].

---

1 Ver "Tipos de Mantenimiento", Capítulo 1.

2 Ver ecuación 2.2.4.

Rutinas de Inspección Dinámicas (RID)

Las inspecciones de máquinas en funcionamiento o el control de sus variables de proceso, son una de las tareas con mayor beneficio en el ámbito del MP. Se llevan a cabo aplicando los sentidos humanos o utilizando instrumental de baja complejidad técnica. Se conocen también como **"Tareas Indirectas de Base".**

La confección de una Ruta de Inspección Dinámica debe ser desarrollada por personal altamente capacitado tanto en mantenimiento como en los procesos productivos de la organización. Su optimización se logra mediante un profundo análisis causa-efecto para cada modo de falla. Se definen como indirectas, debido a que el comportamiento de las variables de proceso indica **indirectamente** la potencial falla de alguna parte o subconjunto del equipo. La misión de los especialistas (Mantenimiento y Producción), es identificar esta relación indirecta entre efecto (variable) y causa (modo de falla).

El siguiente cuadro resume las tareas más frecuentemente realizadas durante un chequeo de recorrida.

Rutina de Inspección	Identificar vibraciones y ruidos extraños.
	Eliminar suciedad, contaminantes y deterioro evidente.
	Detectar puntos calientes y medir temperatura.
	Verificar variables de proceso.
	Identificar pérdidas de fluidos.
	Detectar anomalías y objetos extraños o abandonados.
	Verificar nivel y color de aceites lubricantes.
	Controlar estados de desgaste general.
	Realizar ajustes menores.
	Identificar daños accidentales en los equipos.
	Eliminar materiales peligrosos.
	Recolectar datos de proceso.
	Pruebas menores de estanqueidad.
	Mediciones de corriente.
	Comprobar redundancias o sistemas de protección.

Tabla 2.3.1 Tareas generales más frecuentes en las Rutinas de Inspección.

En la figura 2.3.1 se observan Planillas típicas para Rutinas de Inspección.

Hoja de Inspección Dinámica

Área:	Servicios		**Fecha:**	12/03/2005
Sector:	Sistema de Purificación		**Responsable:**	AJP
Equipo / Línea:	Purificador N° 1		**Tiempo:**	25'
Tipo de Rutina:	Rutina de Inspección Dinámica			
Frecuencia:	Diaria			
Realizó:	Carlos Rodriguez			
Protección Personal y Precaución:	Partículas dispersas: (Protector Ocular)	Autorizó:		*Fotografía del Equipo / Línea o alguna referencia válida que ayude a realizar la Tarea.*
	Puntos calientes: (Precaución / Pirómetro óptico)			
	Riesgo eléctrico: (Cables, equipo con tensión)			
	Zona ruidosa: (Protector Auditivo)	Firma Ejecutante:		
	Zapatos de Seguridad.			
	Sistemas en Movimiento: (Precaución)			

Equipo:	Descripción de la Tarea	Modo	Valor esperado	Acción	Registro/Observaciones
Purificador N°1	Verificar que las conexiones eléctricas del motor no posean daños. Avisar a Mantenimiento en caso de daños.	Visual	OK	Aviso	
	Controlar el nivel de ruido. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de anormalidad.	Auditivo	Sin ruidos	Aviso	
	Medir temperatura del motor eléctrico. Dar aviso al Supervisor de Mantenimiento si es > a 50 °C.	Pirómetro	Inferior a 50 °C	Registro	
	Verificar ausencia de pérdidas de aire en la salida. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de pérdidas.	Auditivo	Sin pérdidas	Aviso	
	Verificar pérdidas de aire en conductos. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de pérdidas.	Auditivo	Sin pérdidas	Aviso	
	Estado de limpieza general. Limpiar.	Visual	Limpio	Limpieza	
	Detectar objetos extraños o abandonados. Retirarlos.	Visual	Sin objetos	Retiro	
	Medir temperatura apoyo cojinetes. Dar aviso al Supervisor de Mantenimiento si es > a 65 °C.	Pirómetro	Inferior a 65 °C	Registro	
	Registrar indicación manómetro de entrada.	Visual	Menor a 1,5 bar	Registro	
	Registrar indicación manómetro de salida.	Visual	Mayor a 3 bar	Registro	
	Verificar que los filtros se encuentren ajustados y sin obstrucciones.	Visual	Firmes y sin obstrucción	Ajuste	
	Verificar que las guardacorreas y protecciones se encuentren colocadas y firmes.	Visual	Colocadas / Firmes	Ajuste	
	Verificar integridad Parada de Emergencia.	Visual	OK	Aviso	
	Verificar integridad, alineación y conexión del sensor de giro. Alinear y limpiar en caso de ser necesario.	Visual	Alineado y Limpio	Ajuste	
	Asegurar que el interior de tablero eléctrico se encuentre libre de objetos extraños, limpio y sin conexiones sueltas. Dar aviso al Supervisor eléctrico si hay conexiones sueltas.	Visual	OK	Limpieza / Aviso	
					Tiempo Real:

Hoja de Inspección Dinámica

Área:	Servicios	**Fecha:**	15/03/2005
Sector:	Generador de Vapor	**Responsable:**	CGB
Equipo / Línea:	Caldera N° 1	**Tiempo:**	30'
Tipo de Rutina:	Rutina de Inspección Dinámica		
Frecuencia:	Diaria		
Realizó:	Roberto García		
Protección Personal y Precaución:	Partículas dispersas: (Protector Ocular)	Autorizó:	*Fotografía del Equipo / Línea o alguna referencia válida que ayude a realizar la Tarea.*
	Puntos calientes: (Precaución / Pirómetro óptico)		
	Riesgo eléctrico: (Cables, equipo con tensión)		
	Zona ruidosa: (Protector Auditivo)	Firma Ejecutante:	
	Zapatos de Seguridad.		
	Sistemas en Movimiento: (Precaución)		

Equipo:	Descripción de la Tarea	Modo	Valor esperado	Acción	Registro/Observaciones
Caldera N°1	Inspeccionar el nivel de agua (en la parte superior) y verificar si se encuentra entre el valor mínino y máximo. Dar aviso al Operador de turno de ser necesario.	Visual	Entre máx - mín	Aviso	
	Observar en el Panel de Control que las alarmas indicativas estén funcionando.	Visual	Sin rojos	Aviso	
	Verificar que la presión de entrada de gas a quemador sea inferior a 2,5 bar. (Parte superior).	Visual	Inferior a 2,5 bar	Registro	
	Verificar que la temperatura de salida de vapor se encuentre entre los valores especificados. (Parte superior).	Visual	Entre 180-210 °C	Registro	
	Registrar estado de carga. (Panel de control)	Visual		Registro	
	Verificar y Registrar el N° de quemadores encendidos. Si es < a 2 dar aviso al Operador de turno. (Sala de control)	Visual	2	Registro	
	Registrar presión de salida en bomba de purga. (Parte superior de tuberías de alimentación).	Visual		Registro	
	Inspeccionar la bomba de purga buscando pérdidas de agua. Dar aviso al Supervisor de Mantenimiento en caso de pérdidas.	Visual	Sin pérdidas	Aviso	
	Controlar el nivel de ruido. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de anormalidad.	Auditivo	Sin ruidos extraños	Aviso	
	Inspeccionar los alrededores buscando vibraciones extrañas. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de encontrarlas.	Auditivo	Sin vibraciones	Aviso	
	Verificar que el nivel de aceite en bomba de purga se encuentre entre los niveles especificados. Agregar de ser necesario.	Visual	Entre marca y máx.	Aviso	
	Registrar temperatura exterior motor de bomba. Dar aviso a Mantenimiento si es > al valor indicado.	Pirómetro	Inferior a 50 °C	Registro	
	Registrar temperatura exterior carcaza de bomba. Dar aviso a Mantenimiento si es > al valor indicado.	Pirómetro	Inferior a 140 °C	Registro	
					Tiempo Real:

Figura 2.3.1
Ejemplo de Planillas de Rutinas de Inspección Dinámica.

Aunque generalmente el control o verificación de niveles de aceite forma parte de las Rutas de Lubricación, en algunas oportunidades se las incluye en las Rutas de Inspección.

2.3.2 Frecuencia de las Rutinas de Inspección

Las rutinas de inspección pueden ser diarias, semanales, mensuales y hasta discrecionales. Las diarias incluyen el monitoreo de variables de proceso para indicar algún defecto incipiente en el equipo. Muchas de estas variables identifican fallas potenciales (sintomáticas) sobre el activo. Si bien son las más útiles a la hora de descubrir anomalías, producen mayor acostumbramiento, por lo que la selección de cada punto debe realizarse junto al ejecutor de la rutina asegurando el mayor beneficio en el mantenimiento del equipo.

Las Rutas de periodo semanal son similares a las anteriores, pero contienen tareas tendientes a descubrir modos de falla que pueden tener consecuencias habiendo transcurrido más de una semana de sucedido. En algunas oportunidades se requiere que el equipo se encuentre fuera de servicio.

Las mensuales agrupan acciones más específicas y demandan mayor grado de capacitación. Involucran detenciones de equipos, pruebas de estanqueidad, verificación de cortes de emergencia y hasta la limpieza interior de componentes. Puede ser necesario detener la producción y desarmar algún subconjunto.

La frecuencia se fija de acuerdo al criterio técnico de los especialistas ayudados por estudios estadísticos, historial de fallas o cálculos de confiabilidad, cuando existan. Luego, se optimizan de acuerdo a la experiencia y a los resultados obtenidos de su aplicación.

A continuación se listan las fuentes más recomendadas para consultar y para estimar o ajustar la periodicidad de las inspecciones.

√ *Experiencia del personal de mantenimiento y producción.*
√ *Análisis causa-raíz de falla.*
√ *Ponderación del intervalo S-F (falla sintomática - falla funcional) si existe y es consistente*[1].
√ *Contexto operativo y consecuencia de los fallos.*
√ *Sistemas de Seguridad y efectos de sus fallos.*
√ *Costo y beneficio de la tarea.*
√ *Nivel de dificultad para la ejecución y grado de capacitación necesario.*
√ *Estado y antigüedad del equipo.*
√ *Nivel de capacitación del ejecutante.*
√ *Registro histórico de fallas. (No es determinante para el ajuste)*

Transcurrido cierto tiempo, y efectuando los análisis correspondiente de los resultados, algunos puntos de las rutinas diarias podrán pasar a semanal, si la situación técnica del modo de falla lo permite. De la misma manera de semanal a mensual.

No obstante, cualquier alteración en la frecuencia de un punto debe aprobarse por personal especialista, y no ajustarse únicamente en función del histórico de fallas.

Nota: La optimización de la periodicidad en las Rutas de Inspección, no debe estar sujeta únicamente a los resultados obtenidos de recorridas anteriores. Muchas veces se cae en la equivocación de ajustar el tiempo (disminuir la frecuencia), sólo en función de los resultados obtenidos. Paradigma: *Falla poco, controlo poco.*

Esto no siempre es correcto dado que muchos modos de falla son de carácter aleatorio y manifiestan eventualmente un estado potencial de falla. El comportamiento aleatorio es propio de la falla sintomática, por lo que el intervalo entre cada inspección se calcula a los efectos de poder actuar antes de la ocurrencia de la falla operacional o funcional[2].

Siendo que generalmente contemplan acciones de bajo costo, y en los casos en que una sobre-verificación no aumente la probabilidad de falla, siempre es más conveniente ser conservador en el armado de las rutas de chequeo. La optimización y reducción de puntos debe justificarse en *bloque*. Un único punto casi nunca representa gran carga laboral, por lo que cualquier modificación masiva hay que justificarla según la mejor relación costo-beneficio de todo el conjunto.

Unidades de medida más utilizadas

Tiempo calendario: Esta variante deberá elegirse cuando la parte del equipo a inspeccionar esté sometida a un deterioro natural que se produzca tanto con equipo en funcionamiento como con el equipo detenido. (Ejemplo: Limpieza de tableros eléctricos, limpieza industrial de equipos, limpieza de elementos electrónicos, etc.).

Horas de marcha: Optar por esta unidad de programación cuando la parte del equipo a inspeccionar esté sometida a un deterioro natural que se produzca mayormente con el equipo en marcha. Para rutinas estáticas tiene sentido esta unidad cuando se respeta rigurosamente el intervalo.

---

1 Ver Mantenimiento Predictivo, Capítulo 3. Sin embargo, en la mayoría de los casos para estas rutinas de inspección no es posible encontrar intervalos S-F útiles.
2 Ver "Tipos de Fallas", sección 1.2.2 Capítulo 1.

Téngase en cuenta que el seguimiento y registro de horas de marcha es laborioso, por lo que el modelo debe contemplar que una vez alcanzado el nivel de horas establecido para la intervención estática de inspección, el equipo se detendrá ineludiblemente. De lo contrario, no tendría sentido su utilización.

Cualquier otra unidad de medida como kilómetros, ciclos o cantidad de producto, también es válida.

Las planillas de inspección mostradas en la figura 2.3.1, deben completarse por el mismo ejecutante de la tarea y **nunca** por otra persona. Normalmente es más seguro consultar cualquier inquietud con el propio realizador que con otra persona que haya oficiado de *anotador*. Los datos surgidos de las verificaciones tienen que trasladarse al historial del equipo sólo por *defecto*; es decir, cuando el punto de control arroja un resultado desfavorable.

Se dijo con anterioridad que el costo de las Rutas de Inspección es despreciable frente a los beneficios obtenidos. Sin embargo, cuando la creación y acumulación de puntos y tareas es deliberada (Paradigma: *Hagamos todo lo que podamos*), suelen confeccionarse extensas listas que acaban aburriendo al personal que las realiza, con el riesgo que esto trae aparejado. Un exceso de inspecciones puede llegar a resultar más caro que las interrupciones y averías que pretenden evitar. Los Planes de Mantenimiento deben ser realizables, y los chequeos de inspección no escapan a esta definición. Al principio es preferible incluir únicamente los puntos cuyos modos de falla se hayan identificado y analizado claramente, para luego agregar nuevos puntos o reemplazar otros. Una ruta de inspección evoluciona permanente; cuando queda *estática* significa que los resultados no se utilizan para su optimización.

Es importante mencionar finalmente que una Hoja de Inspección bien constituida puede incluir acciones de *mantenimiento a condición* y acciones *de búsqueda de fallos ocultos. (Ver Mantenimiento Predictivo y Detectivo).*

2.3.3 Inspecciones de Área

Algunas Hojas de Ruta se implementan para llevar adelante lo que se denominan **Controles Visuales de Criterio por Zonas** con el fin de identificar anomalías en varios equipos de Planta simultáneamente. Son de carácter periódico o discrecional y están fuertemente vinculadas con la Seguridad Industrial.

Objetos ubicados en lugares equivocados, pérdidas de fluidos, escaleras dañadas, salidas de emergencia trabadas u obstruidas, suelos deteriorados, alarmas activadas, ruidos extraños, iluminación deficiente, comportamientos fuera de lo normal, etc., son todas desviaciones posibles de detectar por medio de una **Ruta de Inspección General**. Cuestan poco dinero y efectuadas con rigurosidad permiten detectar situaciones de peligro. La frecuencia habitual es **semanal**.

Cada Ruta abarca una zona determinada y una secuencia de verificación preestablecida con la identificación unívoca de cada ítem o región. Las Rutas de Inspección General no van dirigidas a modos de falla puntuales, sino que se concentran en regiones específicas. Al igual que las Inspecciones Estáticas o Dinámicas son complementarias al mantenimiento preventivo sistemático.

2.3.4 Puesta en marcha de las Rutinas de Inspección

La puesta en marcha de una Rutina de Inspección es un evento trascendente. Algunos tópicos deben asegurarse a la hora de iniciar estos trabajos.

- √ Asegurar que el personal ejecutante sea idóneo y tenga la capacitación adecuada.
- √ La capacitación referida debe incluir no sólo la forma de realizar la verificación, sino también el objetivo de cada punto. La persona debe comprender el modo de falla que se quiere evitar, y es necesario que conozca la acción a tomar si encuentra un desvío. Crear la conciencia de propiedad y responsabilidad bajo el entendimiento compartido.
- √ Contar con los elementos de protección personal y las herramientas necesarias.

- √ Es recomendable haber realizado varias rutinas de prueba junto al especialista tutor y que ambos estén de acuerdo en la forma y el tiempo de ejecución parcial y total. Las pruebas previas al lanzamiento indicarán si el Plan es posible de ejecutar.
- √ Las Hojas de Ruta deben estar claramente redactadas y con espacio suficiente para volcar las observaciones convenientes.
- √ Acompañar al ejecutante durante un tiempo prudencial para garantizar el éxito de cada chequeo, sin que esto sea tomado como un examen a su capacidad. Una regla práctica es tomar progresivamente: 2 veces seguidas la frecuencia de ejecución, 1 vez cada 2 frecuencias, 1 vez cada 4 frecuencias de ejecución, 1 vez cada 8 frecuencias,..... Estos valores son orientativos y es conveniente ajustarlos de acuerdo al tipo de unidad de medida (diaria, semanal o mensual). Cada seis meses llevar adelante inspecciones de sostenimiento.
- √ Materializar inmediatamente en la Hoja de Ruta todas las recomendaciones realizadas por el personal ejecutante, una vez aprobadas por los especialistas. Esto potenciará el espíritu de equipo. En caso que las sugerencias no tengan viabilidad técnica o beneficio alguno, explicar claramente el motivo de la decisión adoptada.
- √ Todos los involucrados deben conocer el circuito de acciones, bien para el manejo de la información ante posibles desvíos, bien para la comunicación de las emergencias o los correctivos necesarios.
- √ Devolver a los operadores el resultado de sus inspecciones (acciones tomadas, fallos evitados, etc.).
- √ Celebrar los logros y éxitos con todo el personal involucrado.

2.4 Rutas de Lubricación

Una tarea preventiva por excelencia

Las tareas de lubricación son actividades básicas de conservación siempre rentables. Si bien representan un costo dado por el lubricante y la mano de obra utilizada para aplicarlo, en general es bajo en comparación a los beneficios obtenidos durante cualquier período de análisis *(periodo H en la sección 2.2.2)*.

Son el pilar fundamental para un Plan Integral de Mantenimiento Preventivo en instalaciones cuyos componentes se encuentran sometidos a movimiento y desgaste. La fricción constituye uno de los peores enemigos en la batalla contra los fallos.

El valor de C_{Tf} por falta de lubricación implica siempre un gasto mayor que el generado por la aplicación del lubricante, C_{Tmp}. Siendo que en la mayoría de los casos esto está justificado, no es necesario evaluar la conveniencia económica para el diseño de las rutas de lubricación. Sólo hay que tener precaución en los puntos para los que una sobre-lubricación es perjudicial.

Un programa de lubricación persigue eliminar modos de falla específicos con consecuencias graves para los activos, tal como el que puede suceder en una caja de engranajes por falta de aceite. En realidad las fallas suceden por *falta de lubricación* o por *degradación del lubricante.*

Una Ruta de Lubricación es una sucesión de puntos a lubricar o inspeccionar, ordenados según algún criterio establecido (geográfico, lógico, funcional, etc), y que deberá respetarse por quien tenga a cargo el trabajo. Resulta de gran ayuda que la persona cuente con el itinerario en forma gráfica como base documental y de apoyo.

Las Rutas de Lubricación contemplan alguna de las siguientes actividades:

√ Adición o reemplazo periódico de grasas lubricantes.
√ Adición / Cambios de aceite, filtros o piezas con baja complejidad técnica.
√ Controles de nivel (eventual registro) y adición en caso de requerirse.
√ Limpieza, ajuste de conectores, verificación de depósitos, registro de información, etc.
√ Cualquier tarea de baja complejidad vinculada a la lubricación de componentes.

Los cambios sistemáticos de lubricantes, filtros o piezas vinculadas al lubricante en reductores, motores de combustión interna, transformadores, depósitos de aceite hidráulico, etc., no es habitual incluirlos dentro de estas Hojas de Ruta debido a que requieren mayor nivel de especialización. Vale decir que, aunque el lubricante es el protagonista, si la tarea encierra cierta complejidad técnica se programan y planifican como tareas de MP por recambio o sustitución sistemática.

La lubricación es desarrollada por el operador de la máquina o por un *lubricador*, y exige un estricto control de cada punto como así también del lubricante adecuado para cada caso.

La tabla 2.4.1 contiene la información a incluir en una Hoja de Ruta de Lubricación.

Rutina de Lubricación	Planta / Sector de la Fábrica o Instalación.
	Fecha requerida de ejecución.
	Número de Hoja de Ruta.
	Equipo ó conjunto de equipos a intervenir.
	Frecuencia de la Hoja de Ruta.
	Punto de lubricación.
	Detalle del punto.
	Tipo de lubricante para cada punto de la Ruta (especificando claramente el código y características).
	Cantidad de lubricante a adicionar.
	El herramental necesario para realizar la tarea.
	Tiempo total de la Ruta y duración en minutos de cada punto.
	Espacio suficiente para observaciones.
	Firma del lubricador o responsable de la tarea.
	Elementos de Seguridad Personal obligatorios.
	Permisos de trabajo o autorización de personal de seguridad.

Tabla 2.4.1 Información a incluir en una Hoja de Ruta de Lubricación.

Comentario sobre los campos de una Hoja de Ruta para Lubricación.

Planta o Sector. Tiene por objeto evitar confusión y poder identificar fácilmente Planta o Sector al que pertenecen los equipos.
Fecha de Ejecución. Permite programar y planificar los trabajos.
Número de Hoja de Ruta. Identificación dada por el sistema informático para la planificación.
Equipo. Código y descripción del equipo a lubricar.
Punto. Orden numérico del punto dentro de la Ruta de Lubricación.
Detalle de los Puntos. Permite describir cualquier recomendación de utilidad para la ejecución del punto, inclusive la especificación de normas o procedimientos de trabajo.
Lubricante. Es imprescindible especificar el tipo de lubricante para cada punto. En mayor medida para los casos en que el lubricante requerido sea de grado alimenticio.
Cantidad de Lubricante. Es recomendable establecer en la Ruta la cantidad mínima o máxima de lubricante a incorporar. Por ejemplo, *dos bombazos de la grasera.*
Frecuencia. Define cual es la periodicidad con la que se efectúa la Ruta.
Tiempo. A los fines de la planificación de tareas, se recomienda conocer el tiempo total de ejecución para la Hoja de Ruta; si es necesario incluir también la duración de cada uno de los puntos.
Observaciones. Cualquier comentario de utilidad que la persona considere de interés técnico, debe poder volcarse a la planilla. Estas anotaciones las analizan los especialistas que planificarán el trabajo de restauración o modificación. Constituyen un buen punto de partida para alimentar el historial del equipo.
Firma del "Lubricador". Garantiza que la tarea se realice.
Precauciones de Seguridad. Incluir todas las recomendaciones necesarias para eliminar los riesgos durante la ejecución, y los elementos de protección personal requeridos.

Logo de la Empresa — Página

Hoja de Ruta para Lubricación — **N° de Plan:** — N° OT:

Ingeniería de Mantenimiento — *División: Mecánica*

Área:	Servicios	**Sector:**		Fecha Ejecución:	15/01/2005
Código de Equipo	100004567			Responsable:	OLG
Equipo / Línea:	Tratamiento de Agua	**Frecuencia:**	Semanal	Tiempo estimado:	2 horas
Fecha	12/01/2005	**Fecha de Inicio:**	15/01/2005		
Permiso	Si - No	**Fecha de Finalización:**	15/01/2005		
Solicitante:	Oscar Lapegue	**Ejecutante:**	Roberto Garcia		
Duración (min):	120				
Comentarios:	Lubricar con máquina en funcionamiento - Limpiar los niples antes de lubricar - El bombeo de Lubricante debe ser suave - No limpiar los niples hasta la próxima Lubricación.				
Protección Personal y Precaución:	Partículas dispersas: (Protector Ocular)		Autorizo:	Fotografía del Equipo / Línea, o alguna referencia válida que ayude a realizar la Tarea.	
	Puntos calientes: (Precaución)				
	Riesgo eléctrico: (Cables, equipo con tensión)				
	Riesgo de golpes: (Utilizar casco)				
	Zona de ruido: (Protector Auditivo)		Firma Ejecutante:		
	Zapatos de Seguridad.				
	Sistemas en movimeinto: (Precaución)				

#	Componente	Descripción	Punto	Detalle Punto	Lubricante	Acción	Cantidad	Respuesta	Observaciones
1	PM12.1	Bomba de Agua Potable	Alemite	Alemite lado accion.	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
2	PM12.1	Bomba de Agua Potable	Alemite	Alemite lado posterior	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	Hay ruido extraño en la bomba
3	PMM12.1	Motor Bomba Agua Potable	Alemite	Alemite lado accion.	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
4	PMM12.1	Motor Bomba Agua Potable	Alemite	Alemite lado posterior	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
5	B14.3	Control nivel de aceite	Vaso	Por encima de marca	Spartan EP 220	Completar	A nivel	OK	
6	B14.4	Control nivel de aceite	Vaso	Por encima de marca	Spartan EP 220	Completar	A nivel	OK	
7	PMM3.7	Motor Bomba Recuperación	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	Ruido en ventilador
8	PMM3.8	Motor Bomba Stand-by	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	1 bombazo	OK	Acoplamiento flojo
9	PMM4.2	Motor Bomba Recuperación	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
10	PMM4.3	Motor Bomba Stand-by	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	1 bombazo	OK	
11	TU1.2	Turbina de grano N° 1	Recipiente	Por encima de marca	Turbina R 32	Completar	A nivel	OK	
12	TU2.2	Turbina de grano N° 2	Recipiente	Por encima de marca	Turbina R 32	Completar	A nivel	OK	
13	TR2.5	Cadena Transporte	Cadena	Sobre cadena	Paraliq P40	Mojado	Aerosol	OK	Exceso de polvo adherido
14	TR3.5	Cadena Transporte	Cadena	Sobre cadena	Paraliq P40	Mojado	Aerosol	OK	
15	TR12.7	Cadena Transporte	Cadena	Sobre cadena	Paraliq P40	Mojado	Aerosol	OK	
16	TS4.5	Transporte s/fin Entrada	Alemite	Alemite lado Sur	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
17	TS4.5	Transporte s/fin Entrada	Alemite	Alemite lado Norte	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	Se ajustó alemite (flojo)
18	TS4.6	Transporte s/fin Salida	Alemite	Alemite lado Sur	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
19	TS4.6	Transporte s/fin Salida	Alemite	Alemite lado Norte	Beacon EP-2	Agregar	2 bombazos	OK	
20	P5.5	Bomba descarga N° 1	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	1 bombazo	OK	
21	P5.6	Bomba descarga N° 2	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	1 bombazo	OK	
22	P5.7	Bomba descarga N° 3	Alemite	Alemite	Beacon EP-2	Agregar	1 bombazo	OK	

Tiempo Real:

Figura 2.4.1
Hoja de Ruta típica para Lubricación.

Instrumentar el circuito completo para las Rutas de Lubricación, utilizando cualquier sistema informático que garantice como mínimo la inclusión de los parámetros arriba mencionados. Si bien algunos componentes no ponen en riesgo su funcionamiento si se los somete a un exceso de lubricación, es conveniente optimizar la cantidad de lubricante por varios motivos. La sobre-lubricación provoca mayores gastos, facilita la contaminación general del equipo por adherencia de polvo, restringe la posibilidad de visualizar desperfectos en rodamientos, puede aumentar considerablemente la temperatura de funcionamiento, etc.

Cuando la Ruta de Lubricación contempla el agregado de lubricantes, se aconseja utilizar siempre el mismo envase para cada tipo, evitando así la mezcla o contaminación con lubricantes diferentes. Cada herramienta (jeringa de lubricación o bidón de adición) tendrá una identificación indicando el tipo de lubricante que lleva en su interior. Es muy útil el uso de un código interno de colores para identificar tanto los envases que suministra el proveedor como las herramientas (jeringas, mangueras o bombas de engrase). Esto cobra carácter obligatorio si los lubricantes a utilizar son de grado (tipo) alimenticio.

En la medida de lo posible es beneficioso también que el punto sea identificado con el lubricante (chapa o acrílico pintado con el tipo ó código del lubricante) en algún lugar visible. En lo que respecta al consumo de lubricante, por ejemplo para el caso de rodamientos, existen tablas para estimar la cantidad de grasa en función del factor de velocidad y del porcentaje de volumen libre del rodamiento[1]. De la misma forma para cadenas y otros tipos de componentes.

Las personas dedicadas a la lubricación deben estar familiarizadas con los principios de la tribología y los mecanismos de desgaste de los componentes en movimiento. La capacitación permanente del personal en este sentido, es imprescindible.

2.4.1 Frecuencia para las Rutas de Lubricación

Al igual que para otras rutinas, la unidad de medida que gobierna una Ruta de Lubricación puede ser días, horas de marcha, kilómetros recorridos, etc. Se deberá escoger la que más se adapte al régimen de marcha de los componentes.

Habiendo identificado y separado aquellos puntos para los cuales una sobre-lubricación es perjudicial, la estimación de la frecuencia se establece en base a la experiencia del personal técnico, el estudio teórico de las posibles fallas, recomendaciones del fabricantes del equipo o del lubricante, y los datos de componentes con características similares. Téngase en cuenta que muchos componentes genéricos se encuentran instalados en una gran variedad de instalaciones, y sus requisitos de lubricación muchas veces pueden ser similares. Estas últimas son generalmente de base calendaria. De todas formas, es imprescindible validar las decisiones con personal técnico calificado, siendo que un mismo componente podrá requerir un plan de lubricación distinto si su contexto operativo también lo es. Recordar que las averías prematuras en cadenas de transmisión, arrastre o sincronización, se dan por una elección inadecuada del lubricante o por un período de lubricación incorrecto.

Para aquellos puntos en los que la frecuencia y cantidad de lubricante debe respetarse estrictamente (generalmente vinculado a horas de marcha), se recomienda establecer una Ruta de Lubricación específica. Téngase en cuenta que podrán existir diferentes Hojas de Ruta en función de las frecuencias establecidas para los puntos. Así, en un mismo Plan Maestro de Mantenimiento Preventivo, suelen coexistir Rutinas de Lubricación diarias, semanales, mensuales, etc. De la misma forma para los casos que la unidad de medida sea, por ejemplo, horas de marcha.

Una vez puesta en marcha la Ruta, sufrirá un proceso de optimización o mejora. Es obligación de los responsables de Mantenimiento hacer un seguimiento sistemático de los parámetros que permitan optimizar frecuencias y cantidades, ayudados por análisis periódicos (inclusive en laboratorio). Recién después de un ciclo completo de mantenimiento (tiempo al cabo del cual el equipo fue sometido a todos los planes de mantenimiento), se puede asegurar que la Ruta, incluyendo su frecuencia, están estabilizados y entregando su mayor potencial. Todo proceso de mejora puede alterar las variables en juego como consecuencia del análisis de los resultados o por las fallas ocurridas debido a una lubricación insuficiente.

---

1 Ver "Grasas Lubricantes", sección 4.4.10 Capítulo 4.

Finalmente, representan una gran ayuda los registros históricos obtenidos de otras Rutas de Lubricación, en lo posible de equipos similares actuando en contextos comparables. Los datos u observaciones relevantes, tienen que trasladarse al historial del equipo sólo por *defecto*; es decir, cuando el punto de lubricación manifiesta alguna anomalía.

En el caso de lubricación por grasa[1] de cojinetes o rodamientos, la frecuencia de reengrase dependerá de:

√ Tamaño del cojinete o rodamiento.
√ Velocidad de giro.
√ Carga aplicada.
√ Temperatura de operación y nivel de humedad.
√ Tipo de grasa.

De los anteriores, el factor que más afecta la frecuencia de reengrase es la temperatura de funcionamiento. Por ejemplo, un rodamiento que se lubrica cada 3 meses y opera a una temperatura de 60 °C, deberá ser lubricado mensualmente (con el mismo lubricante) si la temperatura asciende a 120 °C. El cálculo exacto de la frecuencia de engrase (o reengrase) se obtiene a través de tablas o gráficos de múltiple entrada (provistas por fabricantes de grasas y cojinetes) de acuerdo a las condiciones de temperatura, carga, régimen de marcha y tipo de cojinete antifricción. La consulta de un manual de rodamientos (de marcas reconocidas) puede brindar información de interés para estimar los intervalos iniciales de reengrase o lubricación, como así también el tipo de grasa más aconsejable para cada aplicación.

---

1 Ver sección 4.4.10 "Grasas Lubricantes".

2.5 Calibración

Desde tiempos muy antiguos el hombre se esfuerza en mejorar los sistemas de medición. En la actualidad es imprescindible hacer mediciones en toda actividad; comercio, industria, transporte, medicina, ingeniería, geofísica, meteorología, etc. La ciencia que estudia los procesos de medición se denomina **metrología**, y la calibración de instrumentos, o elementos de control, es parte de ella.

Medir es comparar contra un patrón válido, y un proceso de calibración debe establecer en forma específica las acciones a tomar como resultado de los valores indicados por el instrumento de medición y su relación con las mismas mediciones realizadas con patrones certificados. Un proceso de calibración puede derivar en la corrección de alguna de las partes de los elementos intervenidos; por tanto, bajo la órbita de Mantenimiento se encuentra su gestión.

El objetivo de este apartado es poner de manifiesto únicamente los conceptos básicos de esta rama de la metrología[1], la **metrología industrial**. La misma incluye el control, reajuste o calibración de elementos de medición empleados en los sistemas productivos.

Las instalaciones destinadas a medir variables de proceso sufren desgaste o pérdida de sensibilidad transcurrido algún tiempo (fallas paramétricas), y su patrón de fallas es particular en cada caso. El modo de falla que caracteriza este desgaste se controla a través de la calibración. Un sensor puede sufrir, por ejemplo, dos modos de falla; uno que representa la avería imprevista y repentina obedeciendo probablemente a la ley exponencial; y el otro, la degradación progresiva de su capacidad de medición. Es para mitigar este último que se llevan a cabo las calibraciones.

La calibración de un ítem consiste, entonces, en su *"reajuste periódico"* asegurando una respuesta acorde a las necesidades de calidad exigidas para el proceso productivo durante el intervalo activo del mismo. Mantenimiento (cuando ejecuta estas tareas) es responsable de emitir los certificados que avalan la calibración de las *variables críticas de proceso*. Algunos sistemas de medición están constituidos por varias partes, desde el elemento primario hasta el lazo de medición del sistema de control. El elemento primario se encuentra en contacto directo con la variable de proceso y utiliza o absorbe energía del medio para dar al sistema la señal en respuesta a las variaciones de la variable. Por su parte, el lazo de medición transmite y adapta esa señal para el sistema de control. Así, para la calibración integral (elemento primario + lazo de control) se utilizan dos criterios. Un criterio de calibración de lazo completo denominado *Integral*, y otro de componentes por separado llamado *Individual*.

Un Plan de Calibraciones es un conjunto de acciones sistemáticas, generalmente de ejecución obligatoria, para satisfacer los estándares de calidad en la medición de variables de proceso, garantizando que los servicios o productos elaborados se encuentren conforme a las normas establecidas.

Los componentes habitualmente calibrados miden las siguientes magnitudes:

√ Masa (Peso)
√ Temperatura
√ Presión
√ Presión diferencial
√ Conductividad
√ pH

1 Para mayor profundidad se recomienda al lector consultar bibliografía especializada en metrología industrial.

2.5.1 Definiciones útiles

A continuación se resumen las definiciones más utilizadas en calibración de variables.

Patrón

Un patrón es una medida materializada, instrumento de medir, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores conocidos de una magnitud, a fin de transmitirlos por comparación a otros instrumentos de medición[1]. Las organizaciones, empresas o instituciones utilizan patrones de trabajo que a su vez se calibran contra patrones de referencia oficiales.

Incertidumbre

Es un parámetro asociado al resultado de una medición e indica el intervalo de confianza de los resultados obtenidos en dichas mediciones. Caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse a la medición.

Exactitud de una medición

Congruencia entre lo obtenido de una medición y el valor real de la variable medida.

Resolución: Mínima capacidad de medición de un instrumento de medir.

Histéresis: Diferencia máxima que se observa entre las indicaciones de un instrumento calibrado para el mismo valor del patrón generado durante las calibraciones ascendentes y descendentes.

Calibración Ascendente: Calibración efectuada aumentando los valores patrón generados en el sistema de calibración.

Calibración Descendente: Calibración efectuada disminuyendo los valores patrón generados en el sistema de calibración.

Error: Resultado de una medición menos el valor verdadero de una magnitud.

Error Admisible: Límite máximo especificado del error permitido a un instrumento.

Valor Verdadero: Valor consistente con la definición de una magnitud particular. Se acepta el valor verdadero convencional como el valor atribuido y aceptado para una magnitud, con una incertidumbre apropiada para un propósito determinado.

Lazo de Medición: Cadena de medición formada por diferentes elementos que pueden abarcar desde un sensor primario hasta la indicación de un sistema de control distribuido (Ej.: *termorresistencia + transductor de temperatura + indicador local + registrador).*

2.5.2 Determinación de la incertidumbre

A continuación se enumeran los pasos a seguir para determinar la incertidumbre.

1. Cálculo del error sistemático
   a) Determinar para cada calibración el número "*n*" de mediciones a efectuar en el punto.
   b) Registrar los valores "x_i" correspondientes a cada una de las mediciones.
   c) Para cada una de las mediciones, determinar el error de medición según:

$$E_{r_i} = X_i - P_{ref_i} \qquad (2.5.1)$$

   Donde P_{ref_i} es el valor patrón de referencia.

   d) Determinar para el punto a calibrar el error sistemático de medición como:

$$E_{rs_i} = \frac{\Sigma\ E_{r_i}}{n} \qquad (2.5.2)$$

---

1 Fundamentos de Metrología Industrial, Alvaro Medeiros de Farias Theisen. Porto Alegre, 1997.

2. Determinación de la incertidumbre de medición.

a) Calcular el promedio de las mediciones realizadas "X" según:

$$X = \frac{\Sigma\ X_i}{n} \qquad (2.5.3)$$

b) Calcular la desviación "di" como: $di = xi - X$

c) Calcular la desviación estándar σ como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma\ d_i^2}{n-1}} \qquad (2.5.4)$$

d) Seleccionar el coeficiente "t" de Student para una probabilidad estadística del 95%, ingresando con la cantidad "n" de mediciones en la tabla 2.5.1 correspondiente a la norma **DIN 1319 Parte 3**[1].

e) Cuando se hacen menos de 10 mediciones por punto de calibración, el valor correspondiente a la desviación estándar debe ser afectado por el factor de multiplicación (f_M) dado para k = 2 en la tabla 2.5.2.

f) Se calcula, para cada punto, la incertidumbre de repetibilidad (Incertidumbre tipo A) "I_R" según:

$$I_R = \frac{(t\ .\ f_M\ .\ \sigma)}{\sqrt{n}} \qquad (2.5.5)$$

g) Cuando se calibran instrumentos de medición se adopta como incertidumbre de medición por resolución I_{Res} al resultado de la siguiente expresión:

$$I_{Res} = 0{,}289\ .\ \text{Resolución del instrumento} \qquad (2.5.6)$$

h) Cuando se calibran instrumentos de medición se adopta como incertidumbre de medición por histéresis I_{His} al resultado de la siguiente expresión:

$$I_{His} = 0{,}289\ .\ (\text{Histéresis}_{MAX} - \text{Histéresis}_{MIN}) \qquad (2.5.7)$$

i) Calcular la incertidumbre de medición correspondiente a los patrones utilizados "I_p", según:

$$I_P = \sqrt{(I_{P1}^2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + I_{Pn}^2)} \qquad (2.5.8)$$

Donde I_{P1},....., I_{Pn} son las incertidumbres de medición de cada uno de los patrones utilizados durante la calibración.

NOTA: Cuando el certificado de calibración de un instrumento patrón no consigne el valor correspondiente a la incertidumbre de medición, se tomará el 100% del valor asignado por el fabricante del equipo como error admisible o de clase.

j) Calcular, para cada punto, la incertidumbre estadística de medición I_E como:

$$I_E = \sqrt{I_R^2 + I_{Res}^2 + I_{His}^2 + I_P^2)} \qquad (2.5.9)$$

---

1 Guía ISO para el cálculo de incertidumbre de medición DIN 1319-3.

3. Evaluación de instrumentos de medición

a) Se adopta para el instrumento calibrado como incertidumbre global de medición I_G, al mayor de los valores I_{E1},..., I_{En}.

b) Suelen considerarse como no aptos para el proceso, aquellos instrumentos que durante la calibración presentan valores de incertidumbre global de medición que no satisfagan la siguiente expresión:

$$I_G \leq T_{pr} / 3 \qquad (2.5.10)$$

Donde T_{pr} es la tolerancia de proceso aceptada por el usuario e I_G la incertidumbre global de medición.

La tabla 2.5.1 muestra los valores para t y $t/n^{1/2}$ con distintos niveles de confianza (1 - α).

Valores para t y $t/n^{1/2}$ con distintos valores de nivel de confianza (1 - α)								
Cantidad *n* de mediciones realizadas	(1 - α) = 90.00%		(1 - α) = 95.00%		(1 - α) = 99.00%		(1 - α) = 99.50%	
	t	$t/n^{1/2}$	t	$t/n^{1/2}$	t	$t/n^{1/2}$	t	$t/n^{1/2}$
2	6,31	4,46	12,71	8,98	63,66	45,01	127,32	90,03
3	2,92	1,69	4,30	2,48	9,93	5,73	14,03	8,13
4	2,35	1,18	3,18	1,59	5,84	2,92	7,45	3,73
5	2,13	0,95	2,78	1,24	4,60	2,06	5,60	2,50
6	2,02	0,82	2,57	1,05	4,03	1,65	4,77	1,95
8	1,90	0,67	2,37	0,84	3,50	1,24	4,03	1,42
10	1,83	0,58	2,26	0,71	3,25	1,03	3,69	1,17
13	1,78	0,49	2,18	0,60	3,05	0,85	3,43	0,95
20	1,73	0,39	2,09	0,48	2,86	0,64	3,17	0,71
30	1,70	0,31	2,05	0,37	2,76	0,50	3,04	0,56
32	1,70	0,30	2,04	0,36	2,74	0,49	3,02	0,53
50	1,68	0,24	2,01	0,28	2,68	0,38	2,94	0,42
80	1,66	0,19	1,99	0,22	2,64	0,30	2,89	0,32
100	1,66	0,17	1,98	0,20	2,63	0,26	2,87	0,29
125	1,66	0,15	1,98	0,18	2,62	0,23	2,86	0,26
200	1,65	0,12	1,97	0,14	2,60	0,18	2,84	0,20
más de 200 (t=infinito)	1,65	1,65/b	1,96	1,96/b	2,58	2,58/b	2,81	2,81/b

Tabla 2.5.1
Valores para t y $t/n^{1/2}$ con distintos valores de nivel de confianza (1 - α).

Cantidad de Mediciones	Factor de Multiplicación
2	7,00
3	2,30
4	1,70
5	1,40
6	1,30
7	1,30
8	1,20
9	1,20

Tabla 2.5.2
Valores para el factor de multiplicación o cobertura (f_M) cuando k = 2 (95% de confianza).

2.5.3 Criterio de aceptación para variables de proceso.

La evaluación de la aptitud de un equipo ó instrumento para medir una variable de proceso, se realiza según el siguiente criterio de aceptación:

$$\left\{ \sum_{i=1}^{J} E_{m_i} + \left[\sum_{i=1}^{J} (I_{s_i})^2 \right]^{1/2} \right\} \leq 1 / 3\, T_{pr} \qquad (2.5.11)$$

E_{mi}: Valor absoluto del mayor error sistemático encontrado durante la calibración en todos los componentes del lazo. (Un valor por cada componente del lazo).

I_{si}: Máximo valor de la incertidumbre encontrada durante la calibración en cada componente. (Un valor por cada componente del lazo).

T_{pr}: Tolerancia de proceso aceptada para la variable.
j: Cantidad de elementos que componen el lazo.

Considerando, además:

j = 1 cuando se emplea el criterio integral.

j ≥ 2 cuando se emplea el criterio individual.

Es apropiado, una vez finalizada la calibración, colocar una tarjeta de identificación en el equipo controlado. Si el proceso lo permite, los elementos calibrados se montan nuevamente en su ubicación lógica de funcionamiento.

Si el cliente operativo reclama desvíos ó fallas, realizar los siguientes pasos:

√ Si en el momento que se detecta el desvío no puede efectuarse un control, se evalúa la aplicación de una acción contingente hasta la calibración (el objetivo es garantizar la calidad del proceso productivo).
√ Informar sobre lo actuado a responsables de Mantenimiento, Operaciones, y Calidad.
√ Generar una OT de Restauración o Calibración (dependiente del modelo funcional existente) para que el especialista efectúe el trabajo de reajuste a la mayor brevedad.

Ejemplo 2.5.1

En el ejemplo siguiente se muestran los valores tomados de un ensayo de calibración sobre un manómetro de rango 0 a 10 kg/cm², instalado en un tanque de agua de una planta potabilizadora. La tolerancia de proceso (T_{pr}) fijada para este contexto operativo es de 0.5 [bar]. La calibración se realizó con otro manómetro de clase superior cuya incertidumbre de medición es de 0,002 [bar].

Planilla de trabajo

Punto de Calibración	Equipo Patrón		Equipo Controlado		Error (E_r)
	bar	kg/cm²	kg/cm²	bar	bar
1	0,00	0,00	0,20	0,20	0,200
2	2,50	2,55	2,65	2,60	0,101
3	5,00	5,10	5,15	5,05	0,051
4	7,50	7,65	7,70	7,55	0,052
5	10,00	10,20	10,33	10,13	0,133
5	10,00	10,20	10,35	10,15	0,153
4	7,50	7,65	7,73	7,58	0,082
3	5,00	5,10	5,21	5,11	0,111
2	2,50	2,55	2,63	2,58	0,081
1	0,00	0,00	0,15	0,15	0,150
1	0,00	0,00	0,10	0,10	0,100
2	2,50	2,55	2,60	2,55	0,051
3	5,00	5,10	5,15	5,05	0,051
4	7,50	7,65	7,75	7,60	0,102
5	10,00	10,20	10,33	10,13	0,133
5	10,00	10,20	10,30	10,10	0,103
4	7,50	7,65	7,70	7,55	0,052
3	5,00	5,10	5,20	5,10	0,101
2	2,50	2,55	2,63	2,58	0,081
1	0,00	0,00	0,25	0,25	0,250
1	0,00	0,00	0,20	0,20	0,200
2	2,50	2,55	2,65	2,60	0,101
3	5,00	5,10	5,15	5,05	0,051
4	7,50	7,65	7,70	7,55	0,052
5	10,00	10,20	10,33	10,13	0,133
5	10,00	10,20	10,35	10,15	0,153
4	7,50	7,65	7,73	7,58	0,082
3	5,00	5,10	5,21	5,11	0,111
2	2,50	2,55	2,63	2,58	0,081
1	0,00	0,00	0,25	0,25	0,250

Promedio Lecturas X	Error Sistemático (E_{rs})	Histéresis
bar	bar	bar
0,188	0,188	**Máxima** 0,05
2,581	0,081	
5,078	0,078	**Mínima** -0,15
7,569	0,069	
10,132	0,132	

Tabla 2.5.3
Planilla de Trabajo para Calibraciones.

En la primera columna (Punto de Calibración) se ubican los tres ciclos de medición, cada uno con cinco mediciones ascendentes y descendentes de 0 a 10 Kg/cm² (total 30 mediciones). La 2° y 3° columna refieren los valores indicados por el patrón para cada medición, en bar y Kg/cm². A la derecha, 4° y 5° columna, las mediciones indicadas por el equipo a controlar, también expresadas en Kg/cm² y en bar. La 6° columna marca el error (E_r) de cada punto de calibración según expresa la ecuación 2.5.1. Las tres últimas columnas de la tabla 2.5.3 indican respectivamente, el promedio de las lecturas del equipo a controlar ("X") para los cinco valores de presión establecidos (0, 2.5, 5, 7.5 y 10 Kg/cm²) según la ecuación 2.5.3, el error sistemático (E_{rs}) dado por la ecuación 2.5.2, y la histéresis máxima y mínima para el grupo de valores según la definición de esta sección.

La segunda parte del informe (resultados) se ilustra en la tabla siguiente (2.5.4).

Resumen de calibración							
Valor Nominal	Valor Lecturas	Error Sistemático (E_{rs})	Incertidumbre Patrón (I_P)	Incertidumbre Resolución (I_{Res})	Incertidumbre Histéresis (I_{His})	Incertidumbre Repetibilidad (I_R)	Incertidumbre Estadística (I_E)
bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
0,00	0,188	0,188	0,002	0,003	0,0567	0,0782	0,097
2,50	2,581	0,081	0,002	0,003	0,0567	0,0245	0,062
5,00	5,078	0,078	0,002	0,003	0,0567	0,0418	0,071
7,50	7,569	0,069	0,002	0,003	0,0567	0,0286	0,064
10,00	10,132	0,132	0,002	0,003	0,0567	0,0245	0,062

Tabla 2.5.4
Resumen de Informe de Calibraciones.

En la cuarta columna se vuelca la incertidumbre del patrón (I_P) dada por la ecuación 2.5.8 que, para este ejemplo, es sencillamente 0,002. La incertidumbre de resolución (I_{Res}), 5° columna, se obtiene de aplicar la ecuación 2.5.6. La incertidumbre de histéresis (I_{His}) surge de la ecuación 2.5.7 y la incertidumbre de repetibilidad (I_R) de la ecuación 2.5.5.

Conviene destacar que los valores correspondientes a la incertidumbre de repetibilidad (I_R) se obtienen de calcular, inicialmente, la desviación estándar para cada punto (ecuación 2.5.4 con n = 6); obsérvese que hay seis mediciones para cada uno de los cinco valores de presión. Luego, se ingresa en la tabla 2.5.1 con n = 6 y se obtiene el valor t = 2,57 para un intervalo de confianza del 95%. De la tabla 2.5.2 surge el factor de multiplicación (f_M = 1,30) para n = 6.

Por último, los valores para aplicar el criterio de aceptación son los ubicados en la última columna (I_E), para cada uno de los cinco valores del rango de presión, según indica la ecuación 2.5.9. El mayor de los cinco valores (I_E = 0,097 bar) se llama incertidumbre global de medición (I_G), y debe compararse con 1/3 T_{pr} según ilustra la ecuación 2.5.10.

Obsérvese que este ejemplo satisface la ecuación, pues 1/3 T_{pr} = 0,5/3 = 0,167 > 0,097.

2.5.4 Combinación de sustitución o restauración cíclica y calibración

Es conveniente tener en cuenta algunas consideraciones cuando se efectúa la restitución sistemática (también sustituciones puntuales) de algún componente sujeto a calibración.

- √ Cada componente que se reemplaza, se calibra en forma individual, luego se conecta en el respectivo lazo de medición y se calibra éste último en forma integral; siempre que las condiciones de contexto operativo lo permitan.
- √ Cuando un equipo ó instrumento de medición no puede repararse ó no es factible de ser ajustado, el mismo se reemplaza por uno compatible que luego se calibra antes de la entrada en servicio.
- √ Todos los equipos sujetos a calibración deben identificarse como no fungibles, cada uno tendrá una identidad propia independientemente de la ubicación física que ocupe.
- √ Los equipos a controlar deben ser desmontados del proceso y transportados a un lugar adecuado de trabajo, en caso contrario se controlan en la propia instalación.

Es común contar con diferentes técnicas de calibración según sea la magnitud a medir. Cada una debe detallar específicamente lo que se hace con el equipo, instrumento ó lazo, como así también el tratamiento particular para los patrones utilizados. Asimismo, la técnica debe describir el criterio particular sobre las incertidumbres y su tratamiento.

2.5.5 Frecuencia de Calibración

Para realizar mediciones correctas y duraderas, los elementos deben controlarse o calibrarse periódicamente. El intervalo entre dos calibraciones se denomina **intervalo de calibración**, t_{ca}. Siendo que es elevada la cantidad de factores que intervienen en su determinación, resulta ser el propio usuario el encargado de establecerla, en función de las variables que se mencionan a continuación.

En primer lugar podemos decir que la frecuencia es altamente dependiente del contexto operativo en el que se desenvuelve el elemento y que es difícil determinarla con precisión. Un mismo sistema podrá tener dos intervalos de calibración completamente distintos si cambian las condiciones ambientales de operación. Si bien ya se mencionó que esta característica es propia de todos los ítems de la ingeniería, en el caso de los sistemas de medición cobra mayor importancia. El tiempo entre reajustes depende básicamente de la **variación** que sufran los elementos a lo largo del tiempo y del **rango de variación tolerado**.

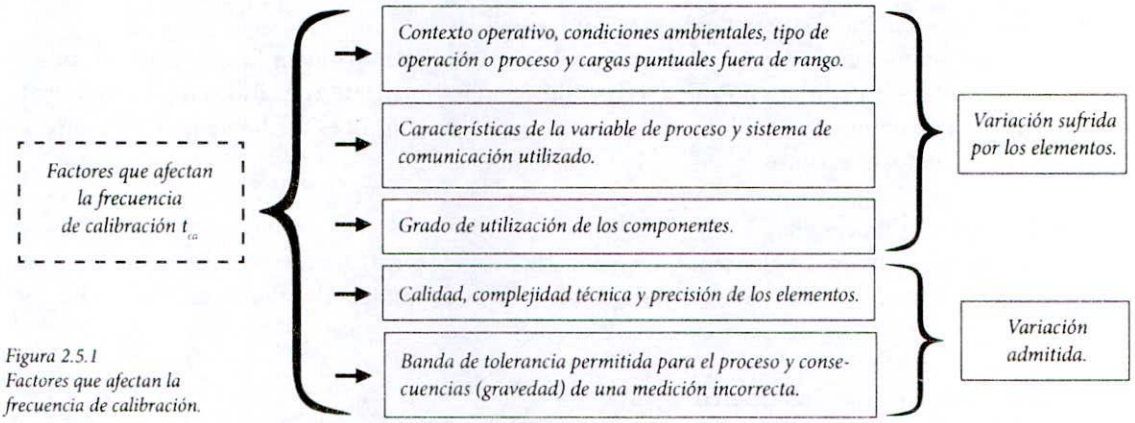


Figura 2.5.1
Factores que afectan la frecuencia de calibración.

Los fabricantes generalmente proponen tentativamente el tiempo de recalibración; de todas formas es posible que las variables críticas de procesos requieran diferentes intervalos, según su aplicación. Lo normal es una calibración anual, situación de equilibrio entre confiabilidad y costo. Las frecuencias entre mensuales y trimestrales, se usan cuando los resultados esperados de la medición son de alta exigencia por confiabilidad.

Cuando en una calibración integral (punta a punta) se detectan desvíos que no son posibles de ajustar, ó se evidencia mal funcionamiento del sistema de medición, se controlan entonces cada uno de los componentes por separado para establecer cuál de ellos tiene mayor influencia sobre los desvíos y actuar en consecuencia por medio de su corrección, restauración ó reemplazo. En rigor, y bajo circunstancias normales de operación, la calibración no cambia durante la vida útil del instrumento. El riesgo aceptado es una medida de la pérdida tolerada de confiabilidad durante la medición. Si las consecuencias de una medición errónea pueden afectar la seguridad de las personas o el medio ambiente, suele ser necesaria la comprobación (prueba funcional de campo) de la exactitud del instrumento en todas las ocasiones previas a su utilización en campo. Situaciones como las mencionadas se dan en instrumentos utilizados en la comprobación de atmósferas explosivas o en ubicaciones potencialmente peligrosas.

A título de ejemplo, ISEA (Asociación Internacional de Equipos de Seguridad) para el caso de los monitores de gas, expresa: *"Se debe realizar una prueba funcional (impacto) o una calibración completa de los monitores de gas portátiles de lectura directa con un gas de prueba adecuado antes de cada uso diario y de acuerdo con las instrucciones del fabricante"*[1].

En lo que respecta al manejo de la información y gestión administrativa de los Planes de Calibración, las **Hojas de Calibración** contemplan habitualmente un Lote de Inspección donde se vuelcan las mediciones que permiten cumplir con los mecanismos técnicos apropiados para la evaluación, cálculo, ajuste y valoración final de las mediciones; lo que puede ser utilizado como certificado interno de calibración. Cuando el modelo funcional no contempla una herramienta informática de administración, los cálculos se deben archivar en algún otro soporte. Los certificados externos también formarán parte del paquete documental de garantía.

2.5.6 Condiciones de almacenaje y mantenimiento

Debe tenerse especial cuidado en las tareas de manipulación, limpieza e identificación de los instrumentos y equipos. La identificación se refiere tanto a instrumentos que se encuentran en funcionamiento como a aquellos en reserva (almacén) o en laboratorios de medición. Las siguientes son algunas de las recomendaciones más destacadas.

√ **Identificar los elementos de medición como no fungibles.**
Todos los elementos que miden variables críticas de proceso, deben ser identificados particularmente y unívocamente. Esto se logra por medio de codificaciones inteligentes de todos los elementos. La única manera de obtener trazabilidad del proceso crítico de control es mediante la codificación de todos los elementos descriptos.

√ **Acondicionar el almacenaje.**
Es importante que tanto los elementos en stand-by como los instrumentos de medición, se almacenen adecuadamente en recintos acondicionados libres de humedad y calor excesivo (entre 18 y 22 °C).

√ **Respetar las acciones de manipuleo.**
El manejo en campo y en laboratorio de los instrumentos debe seguir los lineamientos establecidos por fabricantes, organismos e idóneos en la materia.

√ **Promover la limpieza.**
La limpieza forma parte del mantenimiento. Si no se realiza bajo estricto control técnico, se corre el riesgo de atentar contra la integridad del instrumento.

√ **Identificación como activo o pasivo.**
La tarjeta de identificación debe establecer claramente si se trata de un elemento que se encuentra en reparación para luego ser montado en campo, o bien si es un elemento en stand-by con miras a reemplazar alguno existente ante su falla o descalibración.

√ **No someter las unidades a campos magnéticos o eléctricos.**
Dentro de los cuidados para un correcto mantenimiento de los elementos de medición, se encuentra el hecho de no someterlos a campos magnéticos o eléctricos. Estos factores son capaces de alterar la exactitud de la medición.

---

1 Extraído de RAE Systems Inc. Sitio Web: www.raesystems.com. Nota Técnica T-148.

√ **Idoneidad de los técnicos calibradores.**
Se entiende que todo el personal que intervenga en tareas de calibración y ajuste debe contar con la capacitación técnica necesaria para llevar adelante dichos trabajos.

√ **Establecer la tolerancia admitida en todas las variables de proceso.**
Si la organización cuenta con un sistema de aseguramiento de la calidad, éste debe establecer los rangos de tolerancia admitidos para cada una de las variables críticas de control.

√ **Contar con documentos de calidad claros y apropiados.**
Parte del punto anterior se refiere a la gestión de la información. El mismo sistema de calidad debe contener documentación actualizada y vigente a la fecha de ejecutar un Plan de Mantenimiento para calibración de instrumentos de medición.

El contenido de la sección 2.5 sólo pretende introducir los conceptos básicos de las tareas más comunes para la calibración de equipos, así como la definición de sus frecuencias. Sin embargo, y en todos los casos, se recomienda al lector consultar bibliografía especializada en estas prácticas de Mantenimiento Preventivo.

Resumen de aplicación

2.1 Mantenimiento Preventivo (Programado)

- *Las acciones de carácter pro-activo tienen como finalidad aumentar la disponibilidad de los activos industriales a través de la disminución de las paradas no programadas.*

- *El Mantenimiento Preventivo se realiza a intervalos fijos de tiempo, horas de marcha, ciclos, kilómetros, volumen de producción, etc.*

- *Si no se realiza un análisis técnico-económico adecuado y se aplica Mantenimiento Preventivo (MP) deliberadamente, pueden incrementarse sustancialmente los gastos de mantenimiento sin obtener como contrapartida mejoras en la confiabilidad ni en la disponibilidad.*

2.1.1 Reseña Histórica

- *El mantenimiento preventivo de recambio o restauración fue el más ampliamente aplicado desde la década del 60'.*

2.1.2 Alcance y Definición

- *El Mantenimiento Preventivo consiste en reparar un ítem o reemplazar sus componentes en forma periódica sin importar su estado de condición al iniciar la intervención y bajo la hipótesis de que el patrón de fallas que rige su comportamiento tiene un período de vida útil conocido, alcanzando finalmente los mismos niveles de confiabilidad y calidad originales.*

- *Los objetivos del Mantenimiento Preventivo se pueden resumir en los siguientes puntos:*

  Aumentar la disponibilidad de los activos industriales a través de la disminución de las detenciones no programadas.
  Minimizar las averías imprevistas de los equipos.
  Mejorar el aprovechamiento de mano de obra por medio de la programación de tareas.
  Mejorar la calidad de productos y servicios.
  Disminuir el riesgo para el personal en las operaciones de producción y mantenimiento.
  Minimizar los gastos debidos a reparaciones de emergencia.
  Disminuir el impacto ambiental a través de una mejor planificación de tareas.

2.2 Reemplazos y Conservaciones Programadas

- *El recambio o sustitución periódica (MP por recambio) justifica su aplicación en situaciones cuya función de densidad de fallas f(t) es del tipo normal y de muy baja dispersión para todos los resultados obtenidos; es decir, en aquellos casos para los que la tasa de fallas es creciente a partir de un determinado momento en la mayoría de los elementos.*

- *Para situaciones de alto riesgo en materia de seguridad, todas las acciones preventivas deberán garantizar la supervivencia del elemento luego de efectuada la tarea, y hasta la próxima intervención.*

2.2.1 Hipótesis y condiciones de aplicación

- *La hipótesis fundamental consiste en aceptar y comprobar que la mayoría de las veces el componente falla después de un período de vida útil consistente VU. A partir de allí aumenta rápidamente la probabilidad de falla acumulada F(t).*

- *El Mantenimiento Preventivo tiene aplicación efectiva si la última etapa de vida del componente tiene una dispersión o desviación baja.*

- *Si el comportamiento de la pieza (o sus modos de falla) responde únicamente a la ley exponencial de fallas, la aplicación de MP no sólo no redundará en beneficios, sino que podría incluso afectar seriamente la confiabilidad de todo el sistema, si existe la posibilidad de dejarlo fuera de servicio debido a la propia intervención. En estos casos, la componente de mortalidad infantil inyecta esta probabilidad durante la puesta en marcha.*

2.2.2 Frecuencia de las Tareas Preventivas

- *En la mayoría de los casos, para establecer el intervalo entre dos tareas de mantenimiento, se deben realizar estimaciones y aproximaciones de índole estadístico. Sin embargo, la experiencia acumulada por especialistas durante muchos años, indica que si los datos estadísticos o historial del equipo no están en manos de personal idóneo, tienden a empeorar los resultados de las decisiones adoptadas.*

Parámetro	Fórmula	Descripción / Aplicación
t_{MP}	$t_{MP} << VU$	*Para modos de falla cuyas consecuencias afectan la seguridad y/o el medio ambiente.*
H		*Horizonte de análisis.*
MTBF		*Tiempo medio entre fallas sin MP.*
C_{rp}		*Costo de la tarea de MP.*
C_{bm}		*Costo o pérdida de beneficio marginal.*
C_{ad}		*Gastos adicionales a consecuencia de la rotura imprevista.*
C_{bmp}		*Costo o pérdida provocada por la tarea programada de mantenimiento.*
C_f	$C_f = C_{rp} + C_{bm} + C_{ad}$	*Costo unitario de la falla sin MP.*
C_{mp}	$C_{mp} = C_{rp} + C_{bmp}$	*Costo unitario de la intervención preventiva.*
C_{Tf}	$C_{Tf} = \frac{H \times (C_{rp} + C_{bm} + C_{ad})}{MTBF}$	*Costo total sin MP a lo largo del período H, para modos de falla cuyas consecuencias no afectan la seguridad y/o el medio ambiente.*
C_{Tmp}	$C_{Tmp} = \frac{H \times (C_{rp} + C_{bmp})}{t_{MP}}$	*Costo total con MP durante el período H, para modos de falla cuyas consecuencias no afectan la seguridad y/o el medio ambiente.*
αp	$\int_0^{t_{ap}} f(t)\, d(t)$	*Riesgo preventivo. Probabilidad de que ocurra un fallo en el intervalo $[0;t_{ap}]$.*
t_{MP}	$t_{\alpha p}$	*Para modos de falla cuyas consecuencias no afectan la seguridad y/o el medio ambiente, y puede tolerarse cierto riesgo preventivo.*
C_{mp}	$C_{mp} = (C_{rp} + C_{bmp}) + C_f \times \alpha p$	*Costo unitario de la intervención preventiva cuando puede tolerarse cierto riesgo preventivo.*
C_{Tmp}	$C_{Tmp} = \frac{H \times [(C_{rp} + C_{bmp}) + C_f \times \alpha_p]}{t_{\alpha p}}$	*Costo total con MP durante el período H, para modos de falla cuyas consecuencias no afectan la seguridad y/o el medio ambiente, y puede tolerarse cierto riesgo preventivo.*
p		*Probabilidad de que ocurra una falla a consecuencia de la intervención preventiva.*
αT	$\alpha T = \alpha p + p$	*Riesgo preventivo con probabilidad de mortalidad infantil.*
C_{Tf}	$C_{Tf} = \frac{H \times (C_{rp} + C_{bm} + C_{ad}) \times (1 + p)}{MTBF}$	*Costo total sin MP a lo largo del período H para modos de falla cuyas consecuencias no afectan la seguridad y/o el medio ambiente, con riesgo de falla por la intervención preventiva.*
C_{Tmp}	$C_{Tmp} = \frac{H \times [C_{rp} + C_{bmp} + C_f \times (\alpha p + p)}{t_{\alpha p}}$	*Costo total con MP durante el período H para modos de falla cuyas consecuencias no afectan la seguridad y/o el medio ambiente, con cierta tolerancia al riesgo preventivo y con riesgo de falla por la intervención preventiva.*

- *Habitualmente se cree que el hecho de reemplazar o restaurar ítems elimina toda posibilidad de que ocurra una falla anticipadamente. Esto no es cierto, salvo en los casos para los que la tasa de fallas antes de t_{MP} es cero y el único modo de falla capaz de ocurrir es el dominante analizado.*

2.2.3 Combinación de Tareas (para distintos modos de falla)

- *Un equipo o sistema podrá estar constituido por componentes cuyas periodicidades t_{MP} sean diferentes, por lo que hay que combinarlas, ajustarlas y agruparlas asegurando la mayor eficacia total de conjunto.*

- *El trabajo de combinar tareas preventivas consiste en identificar aquellas frecuencias más cercanas a los múltiplos de otras tareas de mayor o menor periodicidad. Una vez individualizadas, se ajustan haciéndolas múltiplo de alguna otra, reduciendo así la cantidad de detenciones necesarias sobre el equipo.*

2.3 Mantenimiento de Rutina - Chequeos de Recorrida

- *Las rutinas de inspección o chequeos de recorrida se caracterizan por la alta periodicidad y la corta duración, normalmente utilizando los sentidos humanos (vista, olfato, oídos, tacto) y sin ocasionar la indisponibilidad del equipo. Su finalidad es identificar defectos o anomalías evidentes como vibración, suciedad, pérdidas, ruidos, variables de proceso fuera de estado, etc.*

- *Una Hoja de Ruta de Inspección debe especificar claramente cada punto y contar con una descripción de fácil comprensión. Además, deberá indicar las variables a monitorear, el desvío esperado, la frecuencia de realización y cómo actuar en caso de encontrar dicha variable fuera de su estado satisfactorio.*

2.3.1 Rutinas de Inspección

- *Las Rutinas de Inspección Estáticas (RIE) consisten en chequear visualmente los equipos fuera de la operación normal, sin necesariamente efectuar el desarme de componentes. Es una inspección general y de comprobación. Se hacen antes de cada puesta en marcha o en algún otro momento que la operación lo permita sin afectar el proceso productivo.*

- *Las Rutinas de Inspección Dinámicas (RID) se llevan a cabo aplicando los sentidos humanos o utilizando instrumental de baja complejidad técnica durante la operación normal de la máquina.*

2.3.2 Frecuencia de las Rutinas de Inspección

- *La frecuencia se fija de acuerdo al criterio técnico de los especialistas ayudados por estudios estadísticos, historial de fallas o cálculos de confiabilidad, cuando existan. Luego, se optimizan de acuerdo a la experiencia y a los resultados obtenidos de su aplicación.*

- *La optimización de la periodicidad en las Rutas de Inspección, no debe estar sujeta únicamente a los resultados obtenidos de recorridas anteriores. Muchas veces se cae en la equivocación de ajustar el tiempo (disminuir la frecuencia), sólo en función de los resultados obtenidos. Paradigma: Falla poco, controlo poco.*

- *Esto no siempre es correcto dado que muchos modos de falla son de carácter aleatorio y manifiestan eventualmente un estado potencial de falla. El comportamiento aleatorio es propio de la falla sintomática, por lo que el intervalo entre cada inspección se calcula a los efectos de poder actuar antes de la ocurrencia de la falla operacional o funcional.*

- *El costo de las Rutas de Inspección es despreciable frente a los beneficios obtenidos. Sin embargo, cuando la creación y acumulación de puntos y tareas es deliberada (Paradigma: Hagamos todo lo que podamos), suelen confeccionarse extensas listas que acaban aburriendo al personal que las realiza, corriéndose el riesgo de dar por hechas tareas no realizadas.*

2.3.3 Inspecciones de Área

- *Algunas Hojas de Ruta se implementan para llevar adelante lo que se denominan Controles Visuales de Criterio por Zonas con el fin de identificar anomalías en varios equipos de Planta simultáneamente. Son de carácter periódico o discrecional y están fuertemente vinculadas con la Seguridad Industrial.*

2.3.4 Puesta en marcha de las Rutinas de Inspección

- *Al poner en marcha Rutinas de Inspección debe asegurarse que el personal ejecutante sea idóneo y tenga la capacitación adecuada, utilice los elementos de protección personal, haya sido capacitado adecuadamente, tenga la información necesaria para desarrollar su trabajo y sea reconocido por sus logros.*

2.4 Rutas de Lubricación

- *Las tareas de lubricación son el pilar fundamental para un Plan Integral de Mantenimiento Preventivo en instalaciones cuyos componentes se encuentran sometidos a movimiento y desgaste. La fricción constituye uno de los peores enemigos en la batalla contra las fallas.*

- *Una Ruta de Lubricación es una sucesión de puntos a lubricar o inspeccionar, ordenados según algún criterio establecido (geográfico, lógico, funcional, etc.), y que deberá respetarse por quien tenga a cargo el trabajo.*

2.4.1 Frecuencia para las Rutas de Lubricación

- *Al igual que para otras rutinas, la unidad de medida que gobierna una Ruta de Lubricación puede ser días, horas de marcha, kilómetros recorridos, etc. Se deberá escoger la que más se adapte al régimen de marcha de los componentes.*

- *Habiendo identificado y separado aquellos puntos para los cuales una sobre-lubricación es perjudicial, la estimación de la frecuencia se establece en base a la experiencia del personal técnico, el estudio teórico de las posibles fallas, recomendaciones del fabricantes del equipo o del lubricante, y los datos de componentes con características similares.*

- *Es obligación de los responsables de Mantenimiento hacer un seguimiento sistemático de los parámetros que permitan optimizar frecuencias y cantidades, ayudados por análisis periódicos (inclusive en laboratorio).*

2.5 Calibración

- *La ciencia que estudia los procesos de calibración se denomina metrología.*

- *Un Plan de Calibraciones es un conjunto de acciones sistemáticas para satisfacer estándares de calidad en la medición de variables de proceso para que los servicios o productos elaborados se encuentren conforme a las normas establecidas.*

2.5.1 Definiciones útiles

- ***Patrón.*** *Medida materializada, instrumento de medir, material de referencia o sistema de medición, destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores conocidos de una magnitud, a fin de transmitirlos por comparación a otros instrumentos de medición.*

- ***Incertidumbre.*** *Es un parámetro asociado al resultado de una medición e indica el intervalo de confianza de los resultados obtenidos en dichas mediciones.*

- ***Exactitud de una medición.*** *Congruencia entre lo obtenido de una medición y el valor real de la variable medida.*

- ***Resolución.*** *Mínima capacidad de medición de un instrumento de medir.*

- ***Histéresis.*** *Diferencia máxima observada entre las indicaciones de un instrumento calibrado, para el mismo valor de patrón generado en las calibraciones ascendentes y descendentes.*

- ***Calibración ascendente.*** *Calibración efectuada aumentando los valores patrón generados en el sistema de calibración.*

- ***Calibración descendente.*** *Calibración efectuada disminuyendo los valores patrón generados en el sistema de calibración.*

- ***Error.*** *Resultado de una medición menos el valor verdadero de una magnitud.*

- ***Error admisible.*** *Límite máximo especificado del error permitido a un instrumento.*

- ***Valor verdadero.*** *Valor consistente con la definición de una magnitud particular.*

- ***Lazo de medición.*** *Cadena de medición formada por diferentes elementos que pueden abarcar desde un sensor primario hasta la indicación de un sistema de control distribuido (Ej.: termorresistencia + transductor de temperatura + indicador local + registrador).*

2.5.2 Determinación de la incertidumbre

Parámetro	Fórmula	Descripción / Aplicación
E_{ri}	$E_{ri} = X_i - P_{refi}$	*Error sistemático.*
P_{refi}		*Valor patrón de referencia.*
E_{rsi}	$E_{rsi} = \frac{\Sigma\ E_{ri}}{n}$	*Error sistemático de medición.*
X	$X = \frac{\Sigma\ X_i}{n}$	*Promedio de las mediciones.*
d_i	$x_i - x$	*Desviación.*
σ	$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma\ d_i^2}{n-1}}$	*Desviación estándar.*
t	*Tablas correspondientes (DIN 1319 Parte 3).*	*Coeficiente de Student.*
f_M	*Tablas correspondientes.*	*Factor de multiplicación.*
I_R	$I_R = \frac{(t\ .\ f_M\ .\ \sigma)}{\sqrt{n}}$	*Incertidumbre de repetibilidad.*

I_{Res}	$I_{Res} = 0{,}289$. Resolución del instrumento	*Incertidumbre de medición por resolución.*
I_{His}	$I_{His} = 0{,}289$. (Histéresis$_{MAX}$ - Histéresis$_{MIN}$)	*Incertidumbre de medición por histéresis.*
I_P	$I_P = \sqrt{I_{P1}^2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + I_{Pn}^2)}$	*Incertidumbre de medición de patrones.*
I_E	$I_E = \sqrt{I_R^2 + I_{Res}^2 + I_{His}^2 + I_P^2)}$	*Incertidumbre estadística de medición.*
I_G	$I_G \leq T_{pr} / 3$	*Incertidumbre global de medición. Criterio de aceptación.*
E_{mi}		*Valor absoluto del mayor error sistemático durante la calibración.*
I_{si}		*Máximo valor de la incertidumbre encontrada durante la calibración en cada componente.*
T_{pr}		*Tolerancia de proceso aceptada para la variable.*
j		*Cantidad de elementos que componen el lazo.*

2.5.3 Criterio de aceptación para variables de proceso.

$$\left\{\sum_{i=1}^{j} E_{mi} + \left[\sum_{i=1}^{j} (I_{si})^2\right]^{1/2}\right\} \leq 1 / 3\ T_{pr}$$

2.5.4 Combinación de sustitución o restauración cíclica y calibración

- *Cada componente que se reemplaza se calibra en forma individual, luego se conecta en el respectivo lazo de medición y se calibra éste último en forma integral; siempre que las condiciones de contexto operativo lo permitan.*

- *Todos los equipos sujetos a calibración deben identificarse como no fungibles; cada uno tendrá una identidad propia independientemente de la ubicación física que ocupe.*

- *Es común contar con diferentes técnicas de calibración según sea la magnitud a medir. Cada una debe detallar específicamente lo que se hace con el equipo, instrumento ó lazo, como así también el tratamiento particular para los patrones utilizados.*

2.5.5 Frecuencia de Calibración

- *La frecuencia de calibración es dependiente del contexto operativo en el que se desenvuelve el elemento. Un mismo sistema podrá tener dos intervalos de calibración completamente distintos si cambian las condiciones ambientales de funcionamiento.*

- *El tiempo entre reajustes depende básicamente de la variación que sufran los elementos a lo largo del tiempo y del rango de variación tolerado.*

2.5.6 Condiciones de almacenaje y mantenimiento

- *Identificar los elementos de medición como no fungibles.*
- *Los elementos que midan variables críticas, deben ser identificados unívocamente.*
- *Acondicionar el almacenaje y respetar las acciones de manipuleo.*
- *Promover la limpieza.*
- *Identificación como activo o pasivo.*
- *No someter las unidades a campos magnéticos o eléctricos.*
- *Idoneidad de los técnicos calibradores.*
- *Establecer la tolerancia admitida en todas las variables de proceso.*
- *Contar con documentos de calidad claros y apropiados.*

Capítulo 3

Mantenimiento Predictivo y Proactivo

La filosofía no puede sino beneficiarse de nuestras disputas, porque si nuestras concepciones se prueban verdaderas, se llegará a nuevos logros, y si se prueban falsas, su refutación confirmará aún más las doctrinas originales[1].

---

1 Galileo Galilei (1564 - 1642).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Afianzar los conceptos vistos en el Capítulo 1 sobre fallas funcionales y sintomáticas.
- √ Comprender el alcance del Mantenimiento Condicional (Predictivo / Proactivo) como opción estratégica. Reconocer el aporte de la tecnología y su carácter de predicción.
- √ Entender las diferencias conceptuales entre una tarea condicional y un reemplazo sistemático.
- √ Conocer las hipótesis del Mantenimiento Condicional y determinar bajo qué condiciones vale la pena su utilización.
- √ Saber cuáles son los factores principales que garantizan la eficiencia del modelo propuesto.
- √ Comprender la diferencia entre falla sintomática reversible e irreversible, e identificar qué técnica es conveniente aplicar en cada caso.
- √ Diferenciar los distintos niveles de estado paramétrico en las fallas sintomáticas.
- √ Reconocer las variables que gobiernan las frecuencias de inspección (t_{PR}) y estimar su valor.
- √ Evaluar el modelo de monitoreo (Periódico, Discrecional o Continuo) que mejor se ajuste a las necesidades técnicas y económicas del sistema gestionado.
- √ Justificar la aplicación de rutinas basadas en condición.
- √ Diseñar una Ruta de Mantenimiento Condicional.

Índice de Contenidos

3.1 Mantenimiento Condicional (Predictivo / Proactivo)
- Alcance y Definición
- Hipótesis y Condiciones de aplicación
- Ventajas del Mantenimiento Predictivo
- Mantenimiento Proactivo
- Frecuencia de las Tareas Condicionales
- Rutas de Mantenimiento Condicional

Resumen de aplicación

Anexos Relacionados
- Anexo I: Estimación del intervalo $\Delta t_{SFprimario}$

3.1. Mantenimiento Condicional (Predictivo / Proactivo)

Una estrategia poderosa fortalecida por la tecnología moderna.

En el Capítulo anterior se estableció que un programa de Mantenimiento Preventivo propone realizar, en forma sistemática, acciones de restauración o reemplazo periódico. En esta parte, veremos cómo el Mantenimiento Condicional sugiere un plan de inspecciones basado en el monitoreo del estado de funcionamiento del equipo (o alguna de sus variables de proceso), para aprovechar al máximo su vida útil antes de intervenirlo o retirarlo de servicio.

En muchas ocasiones el Mantenimiento Preventivo pierde efectividad porque no es fácil determinar con exactitud la vida útil del elemento en su contexto particular de funcionamiento. Como se sabe, la dispersión de los fallos suele ser alta y las bases de datos son generalmente incompletas. Muchas veces es difícil contar con un historial confiable desde la instalación de un activo hasta su desmantelamiento. El patrón de fallas que rige el Mantenimiento Preventivo (curva de la bañera) y que sirve para fijar el intervalo entre tareas, se obtiene de una muestra de elementos iguales pero actuando en contextos diferentes. Esto ocasiona que muchos elementos se reparen o reemplacen antes de llegar a su máximo aprovechamiento. Además, suelen estar en vigencia (no siempre eficaces) programas de mantenimiento tendientes a evitar las fallas imprevistas, quedando la incógnita de cuánto habrían durado los componentes sustituidos si no se hubiese aplicado el plan. Un estudio estadístico más ajustado, se obtendría de permitir que el total de elementos funcionen en el mismo contexto hasta su falla catastrófica y evaluar la vida para cada uno. Lamentablemente hay procesos demasiado riesgosos como para esperar el resultado de este tipo de ensayos.

Resulta interesante, entonces, plantear alternativas como las que propone el *Mantenimiento Condicional* (expresión más general del Mantenimiento Predictivo y del Proactivo).

Los requerimientos de disponibilidad y eficiencia que la realidad actual impone, obligan a optimizar y evaluar todas las herramientas capaces de reducir los tiempos muertos por paradas no programadas. Con el Mantenimiento Predictivo medimos el deterioro progresivo de cada equipo por separado (o los síntomas prematuros de los defectos de sus partes) sin desarmes mayores, tiempo antes que se produzca la detención súbita. Se procura llevar al límite de su utilización la vida remanente de los componentes del activo. La expresión *mantenimiento condicional* ó *a condición* se fundamenta en que las partes bajo inspección se dejan en funcionamiento a *condición de su estado* al momento del chequeo. Si están bien, las dejamos funcionar; si están mal, las reemplazamos o restauramos. Esto abona la idea general que dice: *"Cuando algo funciona bien, dejémoslo funcionar bien"*. Los resultados de inspeccionar ciertos parámetros, llamados también de *salida*, permiten a los responsables del área de Mantenimiento definir si es conveniente una acción correctiva y en qué momento llevarla a cabo.

Este sistema de mantenimiento no supone únicamente aplicar tecnologías hoy vigentes. Si así fuese, podría pensarse que existe desde hace muy poco tiempo. En realidad, la predicción de defectos incipientes se utiliza desde los comienzos mismos de la actividad industrial. El hombre tiene una tendencia natural a la predicción y algunos sentidos humanos (vista, audición, tacto y olfato) fueron las primeras armas predictivas. El inconveniente radica en que nuestras capacidades humanas son limitadas y subjetivas, y lamentablemente se llega demasiado *tarde* sucediendo la pérdida de función casi consecutivamente al síntoma.

Conforme el desarrollo de la electrónica y otras ciencias, y con el advenimiento de nuevos métodos, algunas fallas prematuras pueden descubrirse con mayor antelación y precisión sin esperar a que acontezca la falla total del equipo para luego actuar en consecuencia. No obstante, sigue siendo sumamente poderoso el uso de los sentidos humanos porque pueden identificarse una amplia gama de fallos simultáneamente y a muy bajo costo[1]. Las estrategias de diagnóstico basadas en el estado paramétrico están tomando cada vez más protagonismo en la batalla contra las fallas, por su efectividad, confiabilidad y bajo costo integral. Por supuesto, sólo resultará ventajoso en aquellos casos para los que la falla *avisa* antes de llegar al deterioro total. Si así ocurre, y estamos lo suficientemente *atentos* (inspeccionando la variable física apropiada en el momento apropiado), entonces podremos seguir la evolución del síntoma minimizando su impacto.

---

1 Ver "Mantenimiento de Rutina – Chequeos de Recorrida", sección 2.3, Capítulo 2.

3.1.1 Alcance y Definición

Un sistema o equipo sometido a un análisis condicional debe encontrarse en funcionamiento, y la ejecución de las inspecciones realizarse en forma periódica. De poco servirá estudiar una muestra de aceite de un transformador de potencia que lleva dos años fuera de servicio o efectuar una termografía infrarroja sobre un tablero desconectado.

En general, los parámetros que se miden en el equipo permiten poner de manifiesto sus fallas sintomáticas[1] provocadas por desgaste, defectos o desviación de alguna variable física. Los mayores beneficios de aplicar una técnica condicional se obtienen en equipos vitales para el proceso productivo, o en aquellos cuyas fallas ponen en riesgo la integridad física de las personas o afectan el medio ambiente.

En virtud de lo anterior, muchas veces se cae en el error de suponer que sólo porque un sistema es prioritario (alta gravedad por su falla), se justifica la utilización de una estrategia condicional; lamentablemente hay modos de falla que no dan indicio alguno de la falla sintomática. Para aplicar monitoreo condicional debe ser técnicamente posible (tecnología + diagnóstico) identificar la falla sintomática para el **modo de falla** estudiado. Además, la estrategia tiene que demostrar cierto nivel de confiabilidad en el diagnóstico.

El Mantenimiento Condicional persigue poner en evidencia, con la mayor anticipación posible, defectos, desvíos o síntomas de falla (fallas sintomáticas) que se manifiestan sobre las piezas o componentes de los equipos en funcionamiento antes de su falla funcional, con la ayuda de instrumentos o pruebas no destructivas minimizando así el perjuicio sobre el servicio o la producción.

Un programa de Mantenimiento Condicional no se limita exclusivamente a tareas de medición, análisis de muestras o captura de datos. Debe incluir el seguimiento permanente de la variable de estudio en el tiempo de operación, debe diagnosticar las causas raíz de falla y predecir con la mayor exactitud el momento oportuno para el reemplazo (vida remanente de seguridad).

Muchos síntomas de avería pueden descubrirse también a través de alteraciones en las propiedades de los productos que el equipo fabrica *(controles de calidad ó control estadístico de proceso)*. Ciertas fallas sintomáticas inciden directamente sobre las especificaciones del producto. Este tipo de rutinas son de baja complejidad técnica pero de gran beneficio porque pueden ser ejecutadas por los mismos operadores de la máquina a través de chequeos de inspección dinámica.

Dentro de las inspecciones condicionales encontramos al *Mantenimiento Predictivo*. Suele decirse que una tarea es de mantenimiento predictivo cuando la medición de la variable física es capaz de identificar fallas sintomáticas irreversibles. Si el resultado de medir la variable refleja un estado de anormalidad en el elemento, se impulsa entonces una acción inevitable de reemplazo o restauración. Lamentablemente no se evita el gasto que ocasionan estos trabajos o los productos rechazados que pudieron haberse generado, pero sí se logra minimizar las consecuencias que la falla repentina ocasionaría. Los trabajos de restauración programados, son en general más breves y económicos que aquellos organizados bajo la presión de una emergencia.

Algunas de las herramientas utilizadas por el Mantenimiento Predictivo son:

√ Los sentidos humanos a través de inspecciones.
√ Análisis de vibraciones.
√ Termografía infrarroja.
√ Pirometría óptica.
√ Inspección por ultrasonido.
√ Cromatografía de líquidos y gases.
√ Emisión acústica.
√ Estetoscopía industrial.
√ Inspección con tintas penetrantes.
√ Análisis de partículas de desgaste.
√ Endoscopia.
√ Rayos X, etc.

---

1 Ver norma MIL-2173 (AS) - "Potential Failure", página 10.

Estas técnicas pueden practicarse en forma continua[1], periódica o discrecional.

Nota: El mantenimiento predictivo difiere del proactivo – ambos constituyen el *mantenimiento a condición* – por el carácter de reversibilidad o irreversibilidad que le confieren a las fallas sintomáticas. En el proactivo, el desvío de la condición normal (falla sintomática) es descubierto con más anticipación que en el predictivo, pudiéndose tomar acciones para desviar la tendencia natural hacia la falla funcional[2] y evitar, en muchos casos, el reemplazo del elemento.

3.1.2 Hipótesis y Condiciones de aplicación

Se mencionó que para aplicar **mantenimiento condicional** debe ser posible detectar alguna característica (variable) relacionada con el grado de deterioro del elemento. Tómese por caso la figura 3.1.1. La misma refiere que el nivel de buen funcionamiento de cierta variable, comienza a decaer en el punto E. A partir de E, el deterioro se hace progresivo hasta culminar en la falla funcional (punto F). No obstante, en raras ocasiones es posible notar el síntoma justo en E.

Cuando el estado paramétrico de la variable (deterioro) alcanza cierto valor, se dice que existe una **Falla Sintomática**[3] (falla incipiente identificable). Cuanto antes pueda detectarse el síntoma (punto S), más largo será el espacio de tiempo entre éste y la falla total de la función, (Δt_{SF} en la figura 3.1.1). Δt_{SF} es el *intervalo* de tiempo durante el cual la falla advierte de su existencia. Para detectarla, el intervalo entre cada inspección debe ser, por cierto, menor que Δt_{SF}. El periodo Δt_{SF} define la fase final de la vida de un elemento; nada nos dice con respecto a su confiabilidad ni al tiempo que *vivió* saludablemente con anterioridad. En adelante, la unidad adoptada para los intervalos, es el *tiempo*; sin embargo, caben las mismas consideraciones para cualquier otra magnitud como horas de marcha, kilómetros, volumen de producción, ciclos, etc.

Un intervalo Δt_{SF} amplio permite hacer los chequeos con menor frecuencia y/o que haya más tiempo para tomar la acción contingente que evite la consecuencia. Por tal motivo, se realizan grandes esfuerzos en establecer las condiciones físicas de una falla sintomática y desarrollar la técnica de detección temprana que permita un intervalo Δt_{SF} extenso. Nótese que un *intervalo extenso* hace que el punto S se acerque al punto E, siendo que el punto *móvil* es S y no E.

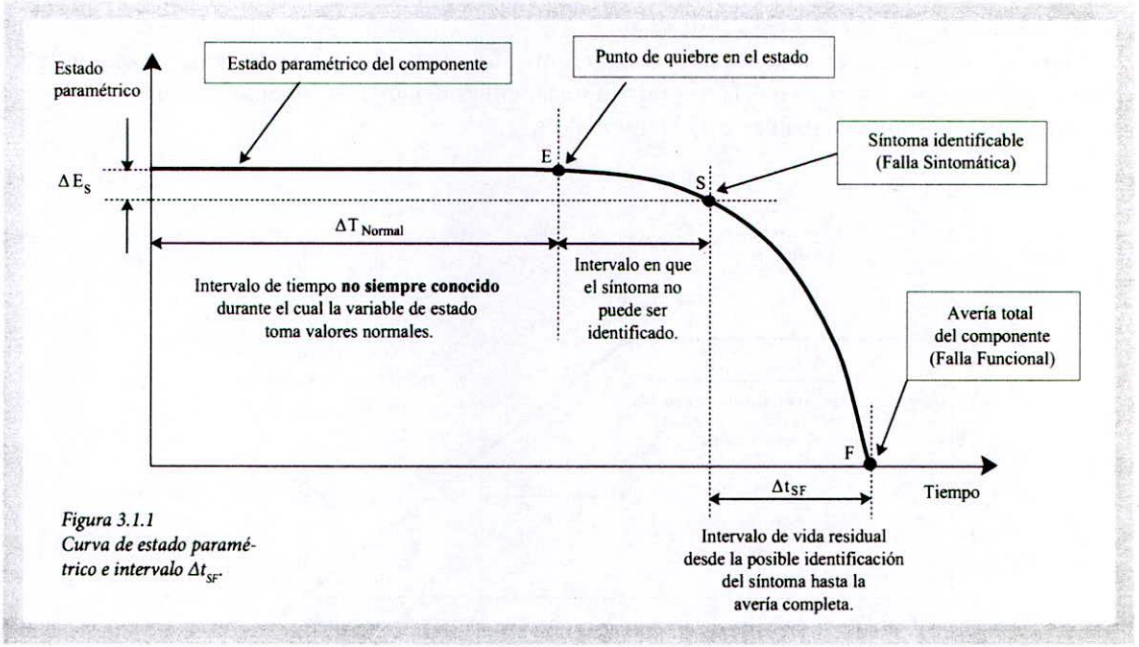


Figura 3.1.1
Curva de estado paramétrico e intervalo Δt_{SF}.

1 Habitualmente los dispositivos de monitoreo continuo se consideran "protecciones indicativas" y su estrategia de mantenimiento se analiza por separado. Ver Mantenimiento Detectivo, Capítulo 5, punto 5.1.1.
2 Ver "Mantenimiento Proactivo", sección 3.1.4.
3 Ver sección 1.2.2 "Tipos de Fallas", Capítulo 1.

La curva de la figura 3.1.1 muestra el estado paramétrico (grado de deterioro) de una condición física o variable. La magnitud medida, intrínseca al elemento, debe demostrar una relación directa entre los valores que adopta y el grado de deterioro.

El *nivel vibratorio* de una máquina rotante, la *temperatura* de un motor eléctrico o la *concentración de ácido* disuelto en un aceite, son ejemplos de variables mensurables y relacionadas con la degradación del componente o del equipo al que pertenece. A partir del punto E, como se dijo, se produce un quiebre en el estado normal y comienza a decaer; de todas maneras, no es seguro que el síntoma pueda identificarse sino hasta S. Por esta razón S se llama falla sintomática y su empeoramiento total hasta allí es ΔE_s. Si bien el **empeoramiento** aparece como *decreciente* a partir de E, éste puede obedecer al *crecimiento* de alguna magnitud física (temperatura, vibración, ruido, concentración de agua, etc.). El deterioro siempre se considera decreciente, independientemente del comportamiento de la magnitud que se evalúa. La transición entre los puntos E y F no necesariamente adopta siempre la forma indicada en la figura anterior; la ley de degradación a partir de E puede ser cualquier otra, aún lineal. Para describir el deterioro paramétrico en función del tiempo (u otra magnitud), se acepta la siguiente expresión:

$$E = E_n - \alpha.t^{\beta} \qquad (3.1.1)$$

E_n representa el valor nominal de buen funcionamiento, α la intensidad y β su ley de variación. Cuando se registran alteraciones en la magnitud medida, se produce una disminución en el estado paramétrico E. Si $\beta = 1$, se tiene una función lineal a partir de E en la variación del estado, como describe la figura 3.1.2. Conforme aumenta el parámetro de forma ($\beta > 1$), el decaimiento se comporta según la figura 3.1.1. El signo menos en el parámetro α ratifica el concepto de **deterioro**, aunque la degradación de la variable pueda manifestarse aún por el aumento de su magnitud.

Resulta evidente, entonces, que el intervalo Δt_{SF} depende tanto de α como de β; a medida que estos aumentan en valor absoluto, más repentino será el deterioro y menor el Δt_{SF}. Es imposible contar con la ley de variación para todas las magnitudes físicas y para todos los elementos. No sólo por la cantidad de parámetros existentes (infinitos valores para α y β), sino, además, porque cada uno adoptará distintas formas de acuerdo al contexto operativo en el que trabaja el equipo. Esto obliga, en principio, a establecer un intervalo Δt_{SF} particular para cada caso.

Algunos especialistas en Ingeniería de Mantenimiento cuentan con buenas aproximaciones para equipos prioritarios. La experiencia y práctica sistemática del mantenimiento condicional, logran aproximaciones bastante confiables para el intervalo Δt_{SF}.

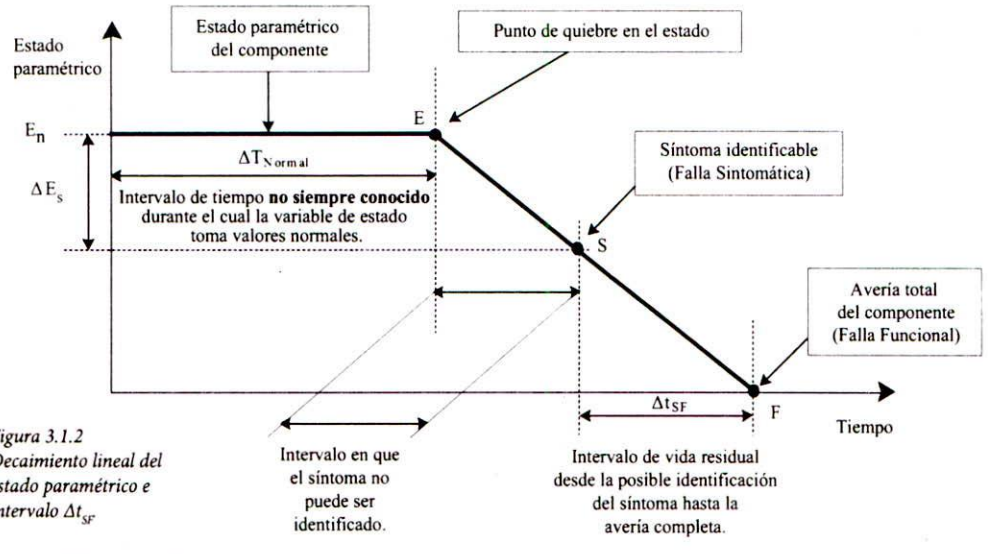


Figura 3.1.2
Decaimiento lineal del estado paramétrico e intervalo Δt_{SF}

Aunque el comportamiento paramétrico de la variable adopta cualquier forma en función de los parámetros α y β, en adelante se utiliza la curva de la figura 3.1.1. Un deterioro lineal a partir de E, se vincula más con fallas sintomáticas relacionadas con la edad del elemento, mientras que un deterioro acelerado (β>1) guarda más relación con fallas sintomáticas del tipo aleatorias (ΔT_{Normal} inconsistente).

La situación nos obliga a establecer qué grado de deterioro debe tener el parámetro para que pueda ser identificado. El punto S, y por consiguiente el tamaño de Δt_{SF}, dependerá del parámetro a controlar y de la metodología utilizada. En la figura, S puede representar alguno de los siguientes síntomas:

√ Daño incipiente en un rodamiento.
√ Zonas calientes en el refractario de un horno.
√ Fisuras o grietas que indican la fatiga de un material.
√ Presencia de metales en el aceite de una máquina.
√ Contaminación con agua de un aceite lubricante de motor.
√ Reducción del espesor de pared en tubos.
√ Puntos calientes en un circuito o en un tendido eléctrico.
√ Falta de adhesión en materiales compuestos.
√ Grado de oxidación de un aceite, etc.

Si el intervalo de estado normal ΔT_{Normal} (figura 3.1.1) fuese siempre conocido y de elevada repetibilidad, tal vez sería conveniente aplicar un reemplazo o restauración sistemática (Mantenimiento Preventivo); por el contrario, si la dispersión de los ΔT_{Normal} es alta (ley de distribución exponencial para la falla sintomática), podría ser útil una inspección predictiva a intervalos fijos (t_{PR})[1] siempre y cuando se cumplan las condiciones enumeradas a continuación.

Es importante resaltar el concepto anterior dado que, si bien puede ser posible encontrar alguna tarea a condición aplicable a la situación estudiada, no necesariamente el intervalo Δt_{SF} cumpla con las condiciones necesarias. Si así fuese, la técnica perdería validez. En el esquema de la figura 3.1.3 se resumen las condiciones que debe satisfacer el intervalo Δt_{SF} para que sea posible (técnicamente) una tarea condicional. Desde luego se deberá lograr también una validación económica para optar por su aplicación. Este concepto se desarrolla más adelante.

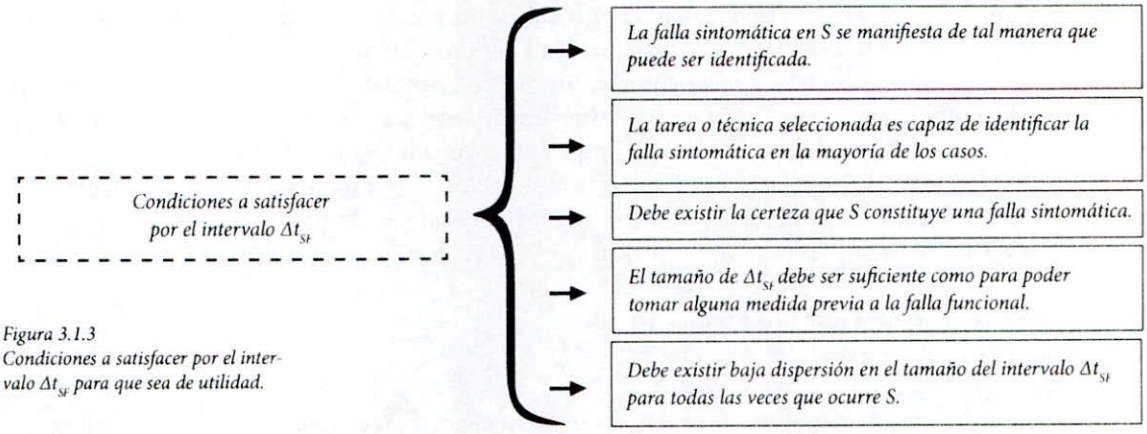


Figura 3.1.3
Condiciones a satisfacer por el intervalo Δt_{SF} para que sea de utilidad.

Los tres factores, magnitud de la variable (o grado de deterioro), intervalo Δt_{SF} y técnica utilizada para el monitoreo, deben coincidir conceptualmente para garantizar la eficiencia del proceso.

La fijación del punto S en la curva de deterioro es vital para calcular el intervalo Δt_{SF}. La manifestación de la falla sintomática sucede en forma progresiva sobre la curva y va tomando diferentes

1 Ver punto 3.1.5 "Frecuencia de las Tareas Condicionales".

estados hasta llegar a la falla funcional. Es por ello que S no siempre es la causa raíz de falla, sino un síntoma del estado de gravedad del componente en cada momento. Una causa raíz evoluciona a lo largo del tiempo y, durante su desarrollo, puede presentarse en distintos estados, lo que obliga a utilizar diferentes técnicas de inspección.

Ejemplo 3.1.1
El eje de una turbina de secado se encuentra montado con rodamientos de alta velocidad serie 6208. La lubricación se logra por medio de un sistema forzado de bombeo y la evolución de la falla sintomática (y su detección), en el conjunto rodamientos más lubricante, puede transcurrir de la siguiente forma.

En primer lugar puede presentarse contaminación sólida en el lubricante, falla sintomática reversible e identificable por medio de un conteo de partículas (ISO 4406). La posible solución consistiría en filtrar el aceite. De no actuarse a tiempo, y a consecuencia de la contaminación, se manifestará alguna falla incipiente en los rodamientos (falla irreversible), lo que podrá detectarse a través de un análisis de vibraciones. Si el deterioro avanza aún más, la termografía infrarroja acusaría un incremento en la temperatura fuera de lo normal (en la medida que sea físicamente posible hacerla). Finalmente, y cerca del colapso, el daño provocado en los rodamientos emitiría un ruido detectable por el oído humano.

Obsérvese que la causa de falla evoluciona manifestando distintos *estados* (alguno de los cuales termina siendo efecto de la causa) y, en función de su gravedad, se aplican diferentes técnicas de chequeo. Algunas herramientas predictivas permiten intervalos Δt_{SF} más largos, pudiendo disminuirse la cantidad de inspecciones. Muchas veces esto justifica la aplicación de un técnica por sobre otra y se cuenta con más tiempo para programar los trabajos de restauración o recambio. Pero quizás el factor más importante para intervalos extensos es que la falla sintomática puede pasar de **irreversible** a **reversible**, con los beneficios económicos que esto implica.

Cuanto más alto y a la izquierda se encuentre S en la curva, habrá menores desviaciones respecto a la condición normal (ΔE_S pequeño), especialmente si en las primeras fases el deterioro no es lineal. Cuanto más pequeña sea la desviación, más sensible debe ser la técnica de monitoreo.

Ejemplo 3.1.2[1]
Pocas dudas quedarían a la hora de clasificar a una pequeña pérdida de aire como falla sintomática, si la misma se manifiesta sobre alguna conexión del colector principal de aire de una Planta Industrial. La avería mayor o falla funcional ocurrirá sólo cuando el nivel de pérdidas sea tal que las funciones a ejecutarse con la presión y caudal no puedan ser satisfechas. En este caso no parece arriesgado proponer rutinas de inspección en las conexiones del sistema, cuya periodicidad será función del tiempo en que la pérdida tolerable tarda en transformarse en intolerable porque afecta directamente la función primaria del insumo. Sin embargo, en un sistema de cañerías transportadoras de gas, aún una pérdida menor representaría la avería funcional por los riesgos que ello provoca en seguridad.

Este ejemplo ratifica la importancia de interpretar el contexto operativo aún tratándose de instalaciones similares o iguales. Las pérdidas en los dos casos podrían ser idénticas, sólo que una debe ser tratada como **sintomática** y la otra como **funcional**.

3.1.3 Ventajas del Mantenimiento Predictivo
Dentro de sus ventajas, se destacan:

- √ Reducir los tiempos de parada no programada pronosticando la falla imprevista con la mínima interrupción del activo.
- √ Seguir la evolución de una falla sintomática a lo largo del tiempo evitando llegar a la avería catastrófica o disminuyendo su consecuencia.
- √ Optimizar los recursos (Mano de obra y Materiales) programando las tareas correctivas o de restauración. Suelen disminuirse las horas extras por reparación de imprevistos.
- √ Realizar diagnósticos discrecionales para analizar causas raíz de falla.

---

1 Ejemplo basado en uno similar propuesto en el libro RCMII – Reliability – Centred Maintenance de John Moubray, página 159.

- √ Aprovechar más *cantidad de vida* en equipos con periodos de vida útil prolongados o cuyo empeoramiento hacia la falla (3° y última etapa de la curva de la bañera) es progresivo. *(No prolonga la vida útil del componente; la aprovecha al máximo a través de la detección de la falla sintomática irreversible).*
- √ Ahorrar energía detectando fugas de calor en sistemas de calefacción o aislamiento.
- √ Disminuir los gastos fijos por ahorro en pólizas de seguro. *(Algunas compañías aseguradoras hacen bonificaciones a Empresas cuyos Programas de Mantenimiento Predictivo se encuentran optimizados, sobre todo en equipos potencialmente peligrosos para la Seguridad o el Medio Ambiente).* Se disminuye el riesgo industrial inherente.
- √ Eliminar daños emergentes en piezas contiguas del equipo o en otras máquinas.

La principal desventaja estriba en que lamentablemente las fallas sintomáticas bajo predictivo son de carácter irreversible, por lo que en rigor esta estrategia no es capaz de alargar la vida útil de los elementos medidos. Las técnicas que permiten identificar síntomas **reversibles** forman parte del Mantenimiento Proactivo.

3.1.4 Mantenimiento Proactivo

Resulta interesante ver cómo ciertas técnicas de monitoreo de condición son capaces de identificar fallas sintomáticas en forma muy prematura. Aprovechar la potencia tecnológica para poner de manifiesto anomalías tan anticipadamente resulta cada vez más conveniente porque minimiza o impide el proceso de transformación de una causa raíz en una falla funcional. El Mantenimiento Proactivo surge como alternativa para anticiparse al momento en que *una causa raíz de falla puede convertirse en una falla sintomática irreversible.* Aunque la estrategia pone de manifiesto síntomas de carácter reversible (causa raíz), no significa que todas las causas raíz sean reversibles. En muchos casos las acciones tomadas como consecuencia de aplicar una tarea proactiva, permiten revertir una situación, que de lo contrario, habría terminado probablemente en una falla sintomática irreversible y luego en una falla funcional.

Las tareas realizadas en Mantenimiento Proactivo son habitualmente de carácter investigativo.

Ejemplo 3.1.3

1 El monitoreo periódico del contenido de agua en los aceites dieléctricos de los transformadores, es una acción proactiva. Una lectura superior a 15 ppm de agua disuelta (ASTM D 1533) es síntoma de la disminución en la rigidez dieléctrica. Si el monitoreo se continua y la variable supera cierto valor de alarma, puede efectuarse una deshidratación y purificación para torcer la tendencia del parámetro desviado (contenido de agua). Así, el síntoma prematuro no derivará en la falla funcional del aceite (y una posible avería grave en el transformador), pudiendo recuperarse.
2. Un alto nivel vibratorio en los engranajes de un reductor es claramente un síntoma de falla sintomática en él, pero seguramente el daño que posea sea irreversible. Sin embargo, si la carga lubricante se somete a un recuento cíclico de partículas (ISO 4406), se podrá inferir que una de las más probables causas raíz de falla en la película lubricante y en las superficies de fricción, puede impedirse. El aceite *limpio* es garantía de una buena lubricación. Considérese como sistema al conjunto reductor más carga lubricante.
3. Los equipos rotantes sobre los que se realiza alineación y/o balanceo periódico, tienen menos posibilidad de presentar fallas sintomáticas irreversibles en sus partes móviles como rodamientos, soportes, mecanismos, etc.

Es muy difícil marcar estrictamente la frontera entre el Mantenimiento Predictivo y el Proactivo. Sin embargo, puede al menos mencionarse que si existe una técnica capaz de identificar S en un estado prematuro de la curva tal que pueda tomarse alguna acción que evite la sustitución final del componente, se dice que ésta es proactiva. La figura 3.1.4, ilustra la posición relativa de algunas técnicas predictivas y proactivas en función de la ubicación que tomarían las distintas fallas sintomáticas.

Cuando la identificación de S, y la acción tomada a consecuencia, logran ***revertir*** *la tendencia hacia la falla funcional del elemento, se dice que la estrategia es proactiva.* A medida que el desarrollo tecnológico aumenta, el punto S se puede retrasar más, lo que brinda la posibilidad de aumentar el intervalo Δt_{SF} y, entonces, disminuir la frecuencia entre inspecciones.

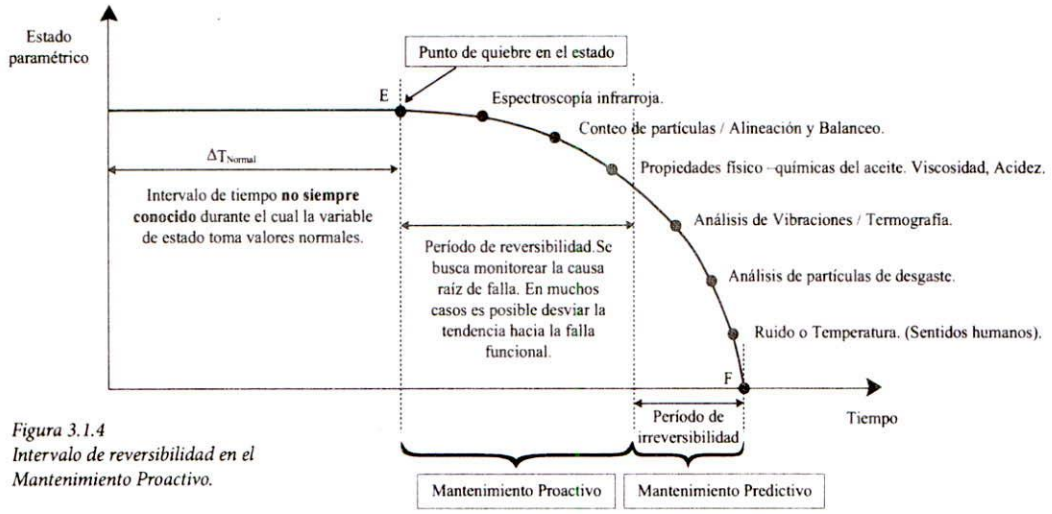


Figura 3.1.4
Intervalo de reversibilidad en el Mantenimiento Proactivo.

Los diferentes puntos sobre la curva sólo muestran las ubicaciones relativas de algunas técnicas condicionales teniendo en cuenta el grado de anticipación en el descubrimiento de la falla sintomática, lo cual ratifica que el intervalo Δt_{SF} no es único para una misma variable y en un mismo contexto operativo. El Mantenimiento Proactivo puede resultar poco efectivo y muy caro si no se planifica racionalmente y no se cuenta con el nivel de capacitación requerido. Debe enfocarse a equipos cuyos modos de falla provoquen graves consecuencias en el activo, en el proceso productivo o en la seguridad.

A continuación se listan algunas herramientas de Mantenimiento Proactivo.

√ Análisis físico - químico de lubricantes (oxidación, viscosidad, etc.).
√ Alineación y Balanceo.
√ Estudios de amperaje.
√ Recuento de partículas contaminantes.
√ Verificación de metales y aleaciones.
√ Seguimiento de niveles térmicos.

Además de los beneficios inherentes al Predictivo, el Mantenimiento Proactivo incorpora los siguientes:

√ Permite analizar la evolución de una falla sintomática reversible prácticamente desde la aparición de la causa raíz, debido a su *sensibilidad* de detección prematura.
√ Provee información para trabajar sobre las causas y no sobre los efectos de los fallos.
√ Reduce los gastos provocados por las fallas sintomáticas irreversibles.
√ Ofrece un panorama muy acotado del estado de los componentes para decidir el momento más oportuno de su reemplazo o reparación.
√ Prolonga la vida de equipos en los cuales la causa raíz hubieran generado una falla sintomática irreversible. Esto permite, en algunas ocasiones, optimizar (aumentar o disminuir) el intervalo entre dos intervenciones preventivas (recambio o restauración) mejorando la confiabilidad y disponibilidad.

Finalmente:

Mantenimiento ***Condicional*** *= Mantenimiento* ***Predictivo*** *+ Mantenimiento* ***Proactivo***

Los factores adversos comúnmente considerados sobre el Mantenimiento Condicional surgen de una evaluación técnica o económica desacertada. Suele referirse al costo que encierran como una desventaja. Si la conveniencia económica se justifica, el costo total e integral será menor, aún cuando el valor de su aplicación parezca elevado.

La necesidad de contar con personal más capacitado para el diagnóstico o interpretación de resultados, se considera más una ventaja que un aspecto negativo, dado que se eleva el nivel técnico general de la organización.

3.1.5 Frecuencia de las Tareas Condicionales

Una acción de mantenimiento condicional puede obedecer a tres tipos distintos de monitoreo; dependiendo del equipo, sistema productivo, falla sintomática o contexto operativo.

√ Periódico.
√ Discrecional.
√ Continuo.

Monitoreo Periódico

El monitoreo condicional periódico abarca inspecciones rutinarias y obligatorias cuya periodicidad, en principio, no debe ser afectada por los resultados obtenidos de cada medición. Al igual que en Mantenimiento Preventivo, es necesario hacer algunas aproximaciones pero siempre con adecuado criterio técnico.

Un factor importante en la fijación de la frecuencia (t_{PR}) es el intervalo Δt_{SF}, en adelante también llamado Δt_{SF} primario o inicial. El intervalo $\Delta t_{SFprimario}$ (figura 3.1.5), es el periodo teórico entre la falla funcional y el máximo valor admitido e identificable para el síntoma, medido hacia atrás. La experiencia de los especialistas adquiere su máxima influencia en la estimación de dicho intervalo, otorgando así garantías al éxito de la inspección. Téngase en cuenta que si bien existen guías o tablas que brindan el $\Delta t_{SFprimario}$ [1], siempre debe realizarse un ajuste final que permita obtener el valor neto en cada caso. El contexto operativo influye decididamente en el ajuste del $\Delta t_{SFprimario}$.

Es conveniente definir magnitudes límites de seguridad o alarma. Por tal motivo, en la figura 3.1.5, S_m indica la máxima lectura de deterioro permitida para el síntoma. Si la inspección arroja un valor S_m, la planificación de la restauración debe ser inmediata. Así, queda establecido el intervalo $\Delta t_{SFprimario}$ entre la falla funcional F y el punto S_m.

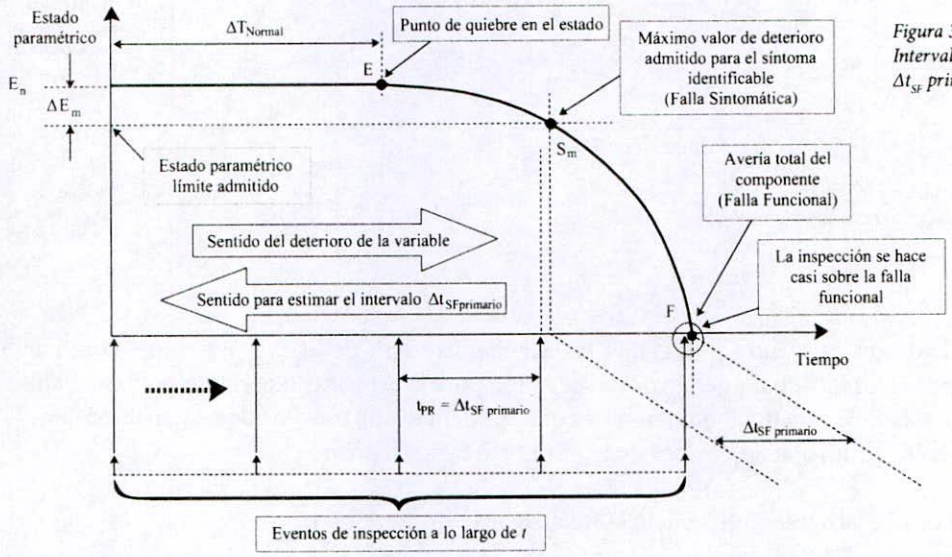


Figura 3.1.5 Intervalo Δt_{SF} primario.

---

1 Ver Anexo I "Tabla para estimar el intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$".

Si se escoge directamente $\Delta t_{SF\ primario}$ como intervalo de vigilancia, la situación más desfavorable será aquella en que la intervención y diagnóstico se realizan un instante antes de que la magnitud alcance el estado S_m. Si todos los otros valores se mantienen constantes, la próxima inspección tocará casi inmediatamente a la falla funcional (Ver círculo en la figura 3.1.5). En la mayoría de los casos el intervalo entre dos inspecciones a condición (t_{PR}), se estima directamente tomando la mitad (y en algunos casos un tercio) del intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$. Esto es bastante seguro para hacer estimaciones rápidas y da, por lo general, muy buenos resultados.

$$t_{PR} \approx \frac{\Delta t_{SF\ primario}}{2} \qquad (3.1.2)$$

Cuando se requieren estimaciones más rigurosas, sobre todo para tener en cuenta el tiempo de programación de las tareas de restauración (t_{plan}), puede procederse de la siguiente forma.

En primer lugar se define el intervalo bruto entre intervenciones condicionales (t_{PRb}), como la diferencia entre $\Delta t_{SF\ primario}$ y el tiempo (ajustado) para planificar la reparación o conmutación del equipo.

$$t_{PRb} = \Delta t_{SF\ primario} - 1{,}2 \times t_{plan} \qquad (3.1.3)$$

Obsérvese que para compensar cualquier error en la estimación del tiempo para programar los trabajos de restauración (t_{plan}), puede incluso introducirse una corrección como muestra la ecuación 3.1.3. El lapso de tiempo estimado para planificación, tiene que ser el suficiente como para organizar todos los recursos; esto es, entrega de repuestos, contratación de servicios, organización de turnos de trabajo, selección del momento más oportuno para producción, etc.

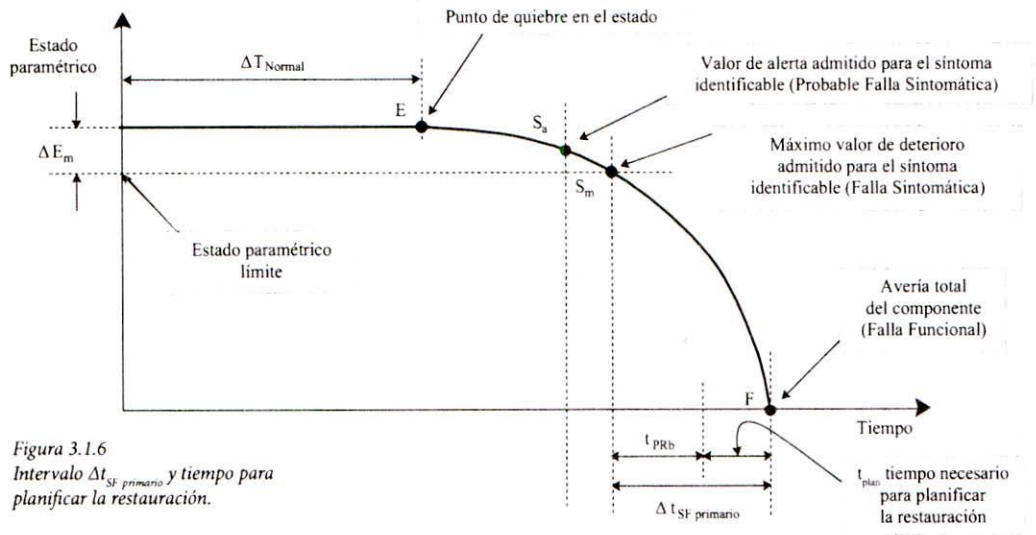


Figura 3.1.6
Intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$ y tiempo para planificar la restauración.

Siendo que el intervalo t_{PRb} es el teórico calculado a partir de $\Delta t_{SFprimario}$, tomarlo como definitivo resulta aún apresurado; cualquier error de medición podría provocar que el tiempo para planificar no sea suficiente y la falla funcional ocurrir antes que comiencen los trabajos de restauración. Por tal motivo, algunas veces es útil afectar el valor de t_{PRb} por otro factor llamado f_{PR}.

Veamos qué variables influyen en la frecuencia de inspección t_{PR}[1].

---

1 Existen análisis estadísticos, basados en la norma MIL-STD 2173 (Reliability - Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment), que ajustan el intervalo de tareas a condición sobre la base de que no existe tarea de inspección completamente efectiva.

1. Bajo poder detectivo inherente a la técnica.
2. Instrumentos no calibrados adecuadamente.
3. Inestabilidad del parámetro medido.
4. Posibilidad que el deterioro se acelere fuera de lo normal (inconsistencia de $\Delta t_{SF\ primario}$).
5. Falta de confiabilidad en el diagnóstico.
6. Riesgo de omitir la inspección.
7. Errores de cualquier otro tipo no considerados entre 1 y 6.

Algunos de estos factores causan que ciertas fallas sintomáticas no puedan ser descubiertas a tiempo.Para estimar f_{PR} se escoge un valor entre 1 y 10 para cada una de las variables, adoptando un número elevado cuando la posibilidad de ocurrencia es alta, y dejando los valores menores para los casos en que esa posibilidad es baja. La suma total de puntos constituye el factor f_{PR} y será el porcentaje en que debe reducirse el intervalo de inspección. La situación más desfavorable calificará con 10 a cada uno, haciendo que la suma total sea 70. Lo más común es obtener valores entre 40 y 60.

$$t_{PR} = (\Delta t_{SF\ primario} - 1{,}2 \times t_{plan}) \times (1 - f_{PR}/100) \qquad (3.1.4)$$

La ecuación anterior es la más general, aunque puede sufrir alteraciones según las siguientes dos situaciones:

1. Cuando t_{plan} es prácticamente despreciable frente a $\Delta t_{SF\ primario}$.

$$t_{PR} \approx \Delta t_{SF\ primario} \times (1 - f_{PR}/100) \qquad (3.1.4\ a)$$

Obsérvese que cuando el factor $(1 - f_{PR}/100)$ promedia el 50%, la ecuación 3.1.4a se aproxima a la ecuación 3.1.2.

2. Cuando t_{plan} es significativo frente $\Delta t_{SF\ primario}$.

$$t_{PR} = (\Delta t_{SF\ primario} - t_{plan}) \times (1 - f_{PR}/100) \qquad (3.1.4\ b)$$

La ecuación 3.1.4b solamente debería utilizarse cuando el tiempo de planificación (t_{plan}) es calculado muy rigurosamente. Cualquier estimación equivocada hará que la falla funcional ocurra antes que se inicien los trabajos de restauración. Téngase presente que una acción de Mantenimiento Condicional debe ser técnicamente realizable a intervalos menores que t_{PR}.

El intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$, contado hacia atrás desde el punto F, fija S_m como máximo **valor de alarma** permitido para la variable, sin perjuicio de que puedan establecerse valores anteriores que permitan un seguimiento exhaustivo en la evolución de la característica. Justamente éste es uno de los motivos que justifica alterar (aumentar) la frecuencia de inspección para casos puntuales de seguimiento (monitoreo discrecional).

En rigor, se fijan dos valores; el primero denominado **valor de alerta** (anterior a S_m y mostrado como S_a en la figura 3.1.6) y el segundo, llamado **valor de alarma**, que se identifica como S_m. Si la magnitud medida alcanza el valor de alerta se sugiere una repetición en la inspección (para compensar errores de lectura, diagnóstico o calibración), o bien un control más frecuente para detectar una posible aceleración en el deterioro. Si bien es cierto que el cálculo de la periodicidad t_{PR} contiene muchas aproximaciones, sirve como punto de partida para fijar frecuencias iniciales que deben ser rigurosas. Siempre resulta más conveniente comenzar con este tipo de estimaciones, que proponer intervalos arbitrarios sin comprender las variables que los gobiernan.

Ejemplo 3.1.4

Luego de algunas estimaciones se logró definir el intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$ de cierto modo de falla en un mes. La identificación de tal síntoma requiere la planificación de algunos trabajos que en las peores condiciones demanda 24 horas. Calcular el intervalo t_{PR} si el puntaje dado a cada uno de los siete factores de ajuste son los mostrados en la tabla siguiente.

#	Factor de Ajuste	Puntaje
1	Bajo poder detectivo inherente a la técnica.	6
2	Instrumentos no calibrados adecuadamente.	4
3	Inestabilidad del parámetro medido.	7
4	Posibilidad que el deterioro se acelere fuera de lo normal (inconsistencia de $\Delta t_{SF\ primario}$).	5
5	Falta de confiabilidad en el diagnóstico.	5
6	Riesgo de omitir la inspección.	3
7	Errores de cualquier otro tipo no considerado entre 1 y 6.	5
	Total	35

Aplicando 3.1.4 se tiene:

$$t_{PR} = (30 \text{ días} - 1{,}2 \text{ días}) \times (1 - 35/100) \approx 18{,}7 \text{ días} \approx \mathbf{2\ semanas.}$$

Nótese que resulta poco práctico realizar una tarea cada 18,7 días, en general se aproxima a frecuencias más genéricas de ejecución (sobre todo cuando esto significa una disminución de t_{PR}). Las aproximaciones que requieren un aumento del intervalo deben validarse técnicamente con los especialistas de mantenimiento condicional[1].

Ejemplo 3.1.5

Supóngase por caso una situación en la que $\Delta t_{SF\ primario}$ es de dos semanas. El proceso de deterioro y la falla sintomática podrían no detectarse si la inspección se realiza una vez por mes. Si en cambio el $\Delta t_{SF\ primario}$ es de 3 meses sería un despilfarro, por ejemplo, chequear dicho elemento una vez por semana aún cuando los factores hayan totalizado un f_{PR} de 50 puntos. En los dos casos se considera despreciable el tiempo de planificación.

Formando parte del contexto operativo encontramos las condiciones externas al sistema, que pueden influir en su comportamiento y en el de la variable de salida medida. Estas condiciones influyen en el factor f_{PR} y por consiguiente en el intervalo t_{PR}.

√ La Seguridad y el Mantenimiento Condicional Periódico

En ciertos equipos la avería funcional ocasiona graves perjuicios en seguridad, poniendo en riesgo la integridad física de personas o medio ambiente. Para estas situaciones el t_{PR}, y los factores que lo afectan, deben ser respetados independientemente del valor que fue tomando históricamente la variable medida. Su aplicación se justifica sólo por el hecho de que la rutina procura evitar fallas cuyas consecuencias son graves. No existe espacio para validación económica alguna.

Debido a los perjuicios que estas fallas ocasionan, se recomienda adoptar un valor $f_{PR} = 50$ aún para los casos en que su puntuación dio por debajo. Una vez establecido el intervalo, ratificar su gradiente de deterioro (factores α y β) y en todo caso mejorar la capacidad de diagnóstico. No es apropiado, por ejemplo, proponer una reducción de la frecuencia sólo porque *"en las últimas ocasiones"* el resultado del chequeo no llegó a S_a. Existen situaciones en que el riesgo tolerado para la falla funcional es tan bajo (por cuestiones de seguridad), que se justifica hacer un análisis de factibilidad para el *monitoreo continuo*. En el epígrafe 3.1.6 se comentan aspectos relacionados con las Rutas de Mantenimiento Condicional. En ellas, y por cuestiones de practicidad, puede resultar necesario incorporar tareas surgidas de este análisis. Sin embargo, agregar un nuevo monitoreo en una ruta ya existente, obliga casi con seguridad que se altere su intervalo. Se deberá validar técnicamente el cambio, sobre todo para los casos en que es necesario un aumento del intervalo. Téngase en cuenta que se trata de inspecciones que buscan evitar o

1 *Ver punto 3.1.6, "Rutas de Mantenimiento Condicional".*

minimizar fallos cuyos efectos pueden afectar la seguridad de las personas o el medio ambiente. Sólo es aceptable una nueva frecuencia, si el cambio no disminuye la mantenibilidad del conjunto y no aumenta la probabilidad de falla.

√ **Si la falla imprevista únicamente tiene impacto económico**

Se busca en esta parte justificar económicamente una tarea condicional para los casos en que la falla funcional únicamente encierra un perjuicio material. Evaluar la aplicación de una rutina bajo estas circunstancias es sencillo. Simplemente debe compararse el costo de su ejecución durante un espacio de tiempo prudencial, contra el costo de no implantar ninguna acción pro-activa (NAP), es decir, trabajar a la rotura de los elementos.

Resulta necesario para esto estimar el $MTBF_S$ de la falla sintomática y asumir que siempre su manifestación conducirá indefectiblemente a una falla funcional, si nada se hiciese para prevenirla. Nótese en la figura 3.1.1 que si bien puede estimarse el Δt_{SF}, el intervalo en que el parámetro de estado se mantiene dentro de valores normales (ΔT_{Normal}), es muchas veces desconocido. No debe caerse en la trampa de pensar que la validación económica de una tarea condicional es simplemente la comparación entre su costo unitario de hacerla, y el costo total que ocasionaría la falla funcional (perjuicio en el activo, impacto en producción, pérdidas por calidad, etc.).

Variables utilizadas para la justificación económica de una tarea condicional.

$MTBF_S$: Tiempo medio entre manifestaciones del síntoma (falla sintomática) que se podría convertir en una falla funcional. Esta información puede obtenerse de estimaciones, o a partir del historial predictivo existente. No confundir $MTBF_S$ con la vida útil del elemento para el modo de falla bajo análisis.

H: Horizonte de análisis. Seleccionar un intervalo lo suficientemente representativo a lo largo del cual se asume que el activo es utilizado en un contexto operativo sin variación. En general caben las mismas recomendaciones que para el Mantenimiento Preventivo, y cuando no se disponga de otra información se considera apropiado tomar entre 4 y 5 veces el valor del $MTBF_S$.

C_{PR}: Costo por realizar una vez *la tarea condicional*. Este valor debe incluir todos los gastos para el monitoreo como ser, mano de obra, materiales, insumos, contratación del servicio, pérdidas de beneficio a consecuencia de realizar la inspección, etc.

C_{Rest}: Costo que insume la restauración surgida a consecuencia de la detección de la falla sintomática. Se deben considerar todos los gastos ocasionados por la intervención, tanto en el equipo como los que pudieran acontecer por pérdidas en producción. Si bien muchas veces es posible programar los trabajos restaurativos sin perjuicio en los servicios, en ocasiones de máxima capacidad, aún será necesario tener en cuenta pérdidas de producción.

C_{TPR}: Costo total del mantenimiento condicional durante el horizonte de análisis H.

C_{ad}: Gastos adicionales a incurrir sobre el activo, además de los de la restauración, si sucede la falla imprevista. La avería repentina generalmente sorprende de tal forma que los gastos de reparación son mayores a los considerados en C_{Rest}. Se deben contemplar los perjuicios económicos adicionales sufridos en el activo o en equipos contiguos, si los hubiera.

C_{bm}: Costo ó pérdida de beneficio marginal a consecuencia de la falla funcional. Caben las mismas consideraciones que para el Mantenimiento Preventivo. Puede suceder, no obstante, que la detención del activo no produzca consecuencias sobre la producción o las ventas por la existencia de pulmones o reservas suficientes, y que luego de reparado, el sistema esté en condiciones de recuperar dicho volumen. En este caso $C_{bm} = 0$. También será despreciable cuando existan equipos capaces de suplir al que falló (redundancias pasivas o stand-by).

C_{Iff}: Costo total que significa no realizar ninguna tarea de mantenimiento condicional a lo largo de H, asumiendo que todas las fallas sintomáticas se convierten en fallas funcionales.

t_{PR}: Intervalo de tiempo fijado entre dos intervenciones condicionales.

El costo total por mantenimiento condicional es:

$$C_{TPR} = C_{PR} \frac{H}{t_{PR}} + C_{Rest} \frac{H}{MTBF_S} \quad (3.1.5)$$

La ecuación anterior no tiene en cuenta los costos ocasionados por la falla funcional imprevista, se asume que nunca pasará inadvertido el síntoma a lo largo de H.

Por su parte, el costo total sin mantenimiento condicional:

$$C_{Tff} = (C_{Rest} + C_{ad} + C_{bm}) \frac{H}{MTBF_S} \quad (3.1.6)$$

Es importante reiterar que en la ecuación 3.1.6, C_{ad} tiene en cuenta únicamente los gastos a incurrir sobre el activo dañado *no considerados* en C_{Rest}.

La justificación económica consiste en cotejar 3.1.5 y 3.1.6; sin embargo, operando con las ecuaciones se puede verificar que sólo es necesario comparar:

$$(1) \frac{C_{PR}}{t_{PR}} \quad \Longleftrightarrow \quad (2) \frac{(C_{ad} + C_{bm})}{MTBF_S} \quad (3.1.7)$$

La evaluación de los términos (1) y (2) expone las variables que afectan la conveniencia o no de aplicar mantenimiento condicional. Siempre que (1) sea menor a (2), conviene aplicar la rutina condicional.

Algunas consideraciones particulares.

- √ Para el caso puntual en que $C_{ad} = C_{bm} = 0$, la aplicación del mantenimiento condicional periódico, en principio, no se justifica. Esto significa que, para las situaciones en que la ocurrencia de la falla funcional cuesta lo mismo que la restauración surgida de detectar la falla sintomática, no es viable económicamente efectuar el monitoreo periódico.
- √ Por su parte, cuando $(C_{ad} + C_{bm})$ es muy elevado resulta interesante analizar como alternativa un monitoreo continuo.
- √ Si el término (1) es superior al (2) hasta en un 10%, aún será ventajoso aplicar Mantenimiento Condicional, para contemplar los posibles errores de estimación en el $MTBF_S$.
- √ Si a juicio de los especialistas el valor de $MTBF_S$ es imposible de estimar, se recomienda comenzar con la aplicación (siempre que no se requieran inversiones importantes) y, luego de suficiente experiencia, evaluar la justificación económica. En este punto se asume que la técnica escogida es confiable para ser de utilidad.
- √ No ajustar el valor de t_{PR} en función de los resultados de chequeos pasados; recordar que éste sólo es influenciado por los factores ya mencionados, nunca por el aumento del $MTBF_S$.
- √ Si el valor del $MTBF_S$ es bajo ($< 5\ t_{PR}$), debe iniciarse de todas maneras un análisis de falla (ADF) para eliminar la causa raíz y evitar la reiteración del síntoma.
- √ Si se escoge la opción de realizar mantenimiento condicional porque (1) es menor a (2), aún es conveniente mantener actualizado el valor de $MTBF_S$ en una base de datos, con el fin de evaluar periódicamente la justificación económica del monitoreo.
- √ Si la elección es no realizar mantenimiento condicional y ningún otro tipo de mantenimiento, la organización debe asumir que pueden surgir situaciones en las que la falla funcional ocurra y ocasione las consecuencias estudiadas. La opción de no efectuar mantenimiento condicional no significa que la falla sintomática nunca ocurrirá.

Ejemplo 3.1.6

Un reductor de transmisión de potencia contiene para su lubricación una carga con 90 litros de aceite. El mismo opera continuamente y cuenta con las protecciones necesarias contra la contaminación de

polvo y otras sustancias. Un código ISO de limpieza por debajo de 18/16/14 garantiza un buen estado de lubricación evitando daños en la película lubricante y, por consiguiente, en sus partes mecánicas. Los especialistas determinaron como límite tolerable de limpieza el expresado más arriba. Si en algún caso se verifica que el nivel de limpieza excede el valor fijado como límite, se procede a una limpieza (filtrado) por recirculación paralela que ocasiona un gasto de $ 550 (incluye mano de obra, filtros, insumos y un nuevo análisis de comprobación). Teniendo en cuenta el contexto operativo, el posible ingreso de contaminantes y el tipo de mecanismo, se fijó en 6 meses el recuento cíclico de partículas (Mantenimiento Proactivo). La muestra de aceite, una vez extraída, se envía al laboratorio para su análisis, lo que tiene un costo total de $ 320. Aún considerando un reemplazo de la carga lubricante cada 3 años, los daños que podría ocasionar un exceso de contaminación no controlado por el lapso de 10 años, harían necesario el recambio completo del juego de engranajes, costo que alcanza los $ 28.500. Por su parte, reponer la carga lubricante cuesta $ 1.850. Dada las características de proceso, reemplazar el reductor se estima que ocasiona pérdidas en producción por $ 21.400. De los datos y experiencia del personal técnico se sabe que en los últimos 6 años en dos oportunidades el nivel de limpieza ISO 4406 superó el valor indicado como límite. Evaluar la conveniencia económica de realizar la tarea proactiva de análisis de aceite.

Aplicando 3.1.5 se obtiene el costo total por mantenimiento proactivo a lo largo de los 10 años.

C_{TPR} = $ 320 x (10 años / 0,5 años) + $ 550 x (10 años / (6 años / 2))

C_{TPR} = **$ 8.234**

Para calcular el costo total sin mantenimiento proactivo se utiliza 3.1.6.

C_{Tff} = [0 + ($ 28.500 + $ 1.850) + $ 21.400] x 10 años / (6 años / 2)

C_{Tff} = **$ 172.500**

Resulta evidente la conveniencia de efectuar un análisis de aceite cada 6 meses. Nótese que en la ecuación 3.1.6 no se consideran los gastos en restauración pues la filtración de la carga lubricante por recirculación sólo se efectúa después del monitoreo periódico.

Si se compara utilizando 3.1.7, se tiene:

(1) $ 320 / 0,5 años ⇨ (2) [($ 28.500 + $ 1.850) + $ 21.400] / (6 años / 2))

(1) **$ 640** ⇨ (2) **$ 17.250**

Lo que también pone de manifiesto el beneficio de realizar la tarea de mantenimiento.

Ejemplo 3.1.7

Un ventilador de extracción en una nave industrial es sometido a un control de su nivel vibratorio cada 15 días. Siendo que se lleva a cabo el programa de lubricación requerido, en los últimos 10 años sólo en dos oportunidades fue necesario detenerlo para cambiar los rodamientos, tarea que ocasiona un gasto total de $ 1.730. Este monto incluye repuestos, mano de obra y materiales. Si el trabajo se realiza dentro de las 12 horas de ocurrida la avería, no afecta a la seguridad de las personas ni obliga a reparaciones adicionales en el ventilador; tampoco produce pérdidas de ningún tipo en la producción. La avería catastrófica en cualquiera de los rodamientos se hace evidente a los operadores del sector inmediatamente. Dada la ubicación del equipo y los métodos utilizados, cada tarea de inspección tiene un costo de $ 104.

Determinar si a lo largo de 5 años es beneficioso llevar adelante tal control.

Directamente utilizando 3.1.7, se tiene:

(1) $ 104 / (1/24 años) ⇨ (2) ($ 0 + $ 0) / (10 años / 2))

(1) **$ 2.496** ⇨ (2) **$ 0**

En función de lo anterior, el mantenimiento condicional no se justifica económicamente.

Monitoreo Discrecional

Un *monitoreo discrecional* se aplica fundamentalmente como apoyo para investigar y resolver problemas crónicos. También para el seguimiento de un equipo en su etapa temprana de asentamiento, o en la parte final de su servicio. Los chequeos discrecionales requieren de mucha experiencia técnica. Los costos para investigar una causa (a igualdad de tecnología), son mayores que en el monitoreo periódico, pues habrá más mediciones, captura de datos y análisis; también más cantidad de insumos y materiales.

Mientras las rutinas de mantenimiento *condicional periódico* cotejan de forma casi instantánea las mediciones con los valores de referencia; en el *monitoreo discrecional* la situación no es tan simple. Es necesario interpretar los resultados desde un punto de vista integral. El especialista debe valerse de toda la potencia de la técnica e inclusive de otras técnicas complementarias. La investigación puntual de un síntoma se fundamenta en el criterio y experiencia del analista, que será finalmente quien proponga la conclusión definitiva y las acciones de mejora a implementar.

Veamos los motivos por los cuales se puede implementar un monitoreo discrecional.

a) Por combinación de tareas.

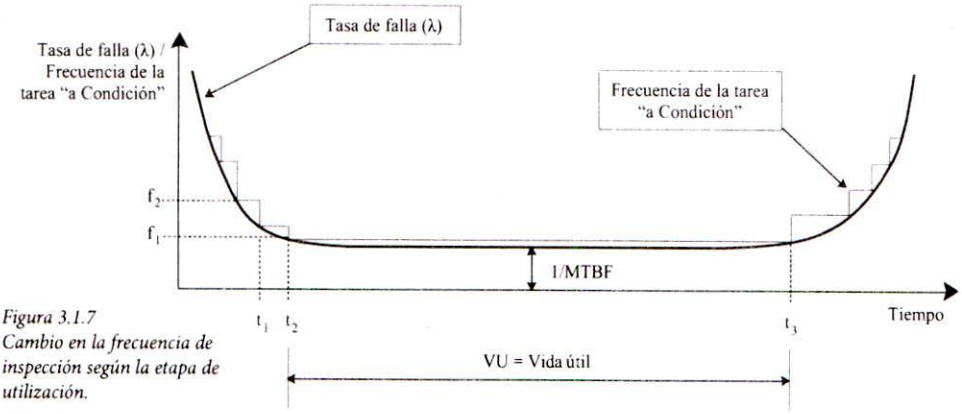


Figura 3.1.7
Cambio en la frecuencia de inspección según la etapa de utilización.

De acuerdo a lo visto en el Capítulo 2, algunos componentes describen, a lo largo de su vida, un comportamiento como el indicado en la figura 3.1.7. Cuando las consecuencias del fallo son graves, además de las tareas preventivas propias de un patrón como el mostrado, suele ser ventajoso adicionar rutinas condicionales; siempre y cuando sean técnicamente viables[1].

La combinación de ambas estrategias maximiza las posibilidades de que el equipo alcance la vida prevista sin interrupciones. La inspección ayudará a mitigar los efectos que entre t_2 y t_3 (VU) aún puedan acontecer porque allí λ=1/MTBF. Durante VU el intervalo entre chequeos condicionales será f_1, con (f_1 < VU). Observar los intervalos de inspección (frecuencias) superpuestos en forma escalonada a lo largo de la curva en la figura 3.1.7. Se aumenta la frecuencia para las etapas donde la tasa de falla es mayor. Entre t_1 y t_2, por ejemplo, la periodicidad ya se incrementa hasta f_2. Tanto en la zona de asentamiento (mortalidad infantil) como en la de agotamiento del elemento bajo vigilancia, la frecuencia es mayor.

1 Ver "La Seguridad y el Mantenimiento Preventivo Periódico", sección 2.2.2, Capítulo 2.

Si bien esta práctica combinada no se aplica indiscriminadamente en cualquier equipo bajo Preventivo, da muy buenos resultados cuando la avería provoca daños graves en el activo; siempre que sea una rutina de inspección técnicamente válida.

Ejemplo 3.1.8

Un motor diesel de uso marino contiene 1.200 litros de aceite lubricante. Tanto la base como el paquete de aditivos desarrollados especialmente para trabajar bajo estas condiciones, deberían conservar sus propiedades y ser de utilidad hasta las 400 horas de marcha, por lo menos. Sin embargo, recomiendan efectuar un análisis de laboratorio en el aceite cada 100 horas para asegurar que todas las características conservan su estado paramétrico normal. Cuando el motor se somete a un mantenimiento de restauración mayor (cambio de conjuntos, cojinetes de fricción, ajustes, etc.), y durante las primeras horas de marcha, se llevan adelante chequeos discrecionales para evaluar la evolución del asentamiento. Por este motivo se toman y analizan muestras de aceite a las 5, 10 y 50 horas de marcha. La información que brindan estos muestreos permite seguir la evolución del lubricante, pero fundamentalmente la del motor. A su vez el reemplazo total de la carga lubricante (sugerido cada 400 horas) tiene un costo elevado, por lo que se implementan análisis más frecuentes a partir de las 100 horas de marcha. El objetivo es monitorear el envejecimiento del aceite y aprovechar la mayor cantidad de horas sin poner en riesgo la *salud* del motor.

La tribología[1] es una actividad científica que brinda un panorama muy preciso del estado del lubricante (base + aditivos) y del motor, pudiendo en muchos casos, aprovechar hasta un 25% más de uso respecto al intervalo cíclico de sustitución sugerido.

Nótese que hay tres etapas bien definidas en las cuales el mantenimiento condicional tiene frecuencias diferentes y persigue objetivos también distintos. Se analiza a continuación cada una.

- √ En la etapa central (t_2-t_3) se espera que el componente (carga lubricante) mantenga su tasa de fallas (λ) de manera constante (Mantenimiento Preventivo). Para asegurar λ=cte, y muchas veces incluso para disminuirla, se propone una estrategia de refuerzo como el Mantenimiento Condicional con frecuencia f_1. (**Objetivo Primario:** Seguir la evolución del *Equipo + Carga Lubricante*).
- √ Durante el asentamiento (luego de reparaciones mayores) hasta t_2, el lubricante se controla exhaustivamente porque tiene la capacidad de brindar información de suma importancia en lo referente a su estado y a la evolución del motor. Los intervalos de toma variarán de acuerdo al equipo y contexto operativo, pero siempre serán menores (mayor frecuencia) que los de la etapa VU. (**Objetivo Primario:** Seguir la evolución del *Equipo*).
- √ Finalmente, cuando la vida del lubricante está por llegar al límite de utilización, se monitorean las propiedades para maximizar su aprovechamiento (alargar el reemplazo), sin poner en peligro la integridad mecánica de la máquina. (**Objetivo Primario:** Seguir la evolución del *Lubricante*).

De este último punto se deduce que tanto en las etapas tempranas de puesta en marcha del activo como en los finales de la vida del lubricante (componente), puede ser de utilidad implantar rutinas de monitoreo discrecional y controlar la evolución de alguna variable de estado en particular. Para los casos de monitoreo discrecional, tampoco son rígidos los valores de alerta o alarma. Si los objetivos que persiguen estos chequeos puntuales son diferentes, seguramente lo serán también los límites para las variables físicas.

Ejemplo 3.1.9

Retomemos el ejemplo 3.1.6 del reductor de transmisión. Si al mismo se le efectuase una gran reparación con cambio de piezas y mecanismos de engrane, tal vez resultaría apropiado realizar muestreos (conteo de partículas y ferrografía) en la etapa de asentamiento. Sin embargo, es muy probable que los códigos ISO de limpieza esperados para esta etapa sean menos exigentes que los establecidos para el periodo de funcionamiento normal (18/16/14 en el ejemplo). Una vez renovado o filtrado el aceite luego del asentamiento (si aplica), el valor límite de seguimiento volvería al indicado como normal, esperando que la contaminación se reduzca conforme aumentan las horas de marcha.

1 Ver "Tribología y Análisis de Aceites", sección 4.4 del Capítulo 4.

Nota: Como se analizó antes, cuando las propiedades de los componentes bajo inspección condicional se alteran (por factores internos o externos), se sucederán también variaciones en las magnitudes medidas. A esta relación se la conoce como **sensibilidad**. Cuando se analiza la factibilidad técnica de aplicar mantenimiento condicional, se debe procurar siempre hallar relaciones (propiedad - variable medida) de máxima sensibilidad que permitan seguir en forma precisa la evolución de la propiedad a través de la variación de la variable. En el *monitoreo discrecional* es fundamental conocer acabadamente la sensibilidad del conjunto *propiedad - variable medida.*

Un ejemplo típico lo constituye el análisis y estudio de aditivos en los aceites de uso industrial. El comportamiento durante la vida del aceite de estos agregados químicos no crece o decrece de manera permanente. Algunos se comportan de forma muy variada conforme transcurre el desgaste, y no hay una relación lineal entre crecimiento / decrecimiento y uso del lubricante. Por tal razón, el analista debe conocer en detalle la ley de variación para arribar a diagnósticos acertados.

b) Para analizar causas de falla

El uso de técnicas condicionales para estudiar causas de fallas (ADF - Análisis de Fallas), es una tarea netamente de investigación. Efectivamente, la frecuencia es *discrecional* y el especialista hecha mano de estas herramientas como soporte técnico para culminar en el diagnóstico de la falla que permita eliminar o minimizar sus consecuencias.

Hay situaciones de elevada complejidad que requieren un seguimiento o monitoreo extremadamente frecuente de determinadas variables para resolver problemas crónicos. El estudio se realiza en forma puntual sobre equipos con roturas frecuentes, errores de operación, deterioro acelerado, etc. y que podrían acusar algún síntoma. Son trabajos puntuales y específicos. Si bien es posible que el activo ya se encuentre bajo *preventivo* o *condicional periódico*; puede resultar conveniente efectuar un ADF para establecer la causa raíz que provoca la avería. La conveniencia económica se justifica comparando el gasto que ocasiona la investigación, contra el gasto actual que ocasionan las reiteradas averías que se pretenden evitar. Esto último es sumamente importante dado que en muchas ocasiones se hacen grandes esfuerzos en eliminar causas de falla que en rigor no representan efectos significativos a largo plazo.

Hay circunstancias en las que resulta necesario hacer un diagnóstico *base cero* de un activo en funcionamiento porque será trasladado a una nueva ubicación lógica. Dado que las exigencias funcionales pueden ser distintas (cambia el contexto operativo), es interesante contar con un panorama completo de la máquina. Se utiliza una *batería* de tecnologías condicionales para establecer su estado paramétrico. De su aplicación posiblemente surjan acciones de restauración, sin perjuicio de que luego de efectuadas, deberá diseñarse y ponerse en práctica el plan de manteniendo definitivo y más eficaz para el activo trasladado.

Es habitual tercerizar las tareas de investigación por el elevado conocimiento técnico requerido, y por los montos de inversión necesarios para valerse del equipamiento. De todas maneras, las áreas responsables del mantenimiento deben destinar personal para conducir las acciones de mejora. En todo caso se aconseja conformar un equipo multidisciplinario con personal especialista externo y con un referente de la empresa. Esto garantiza que se delegue la ejecución de los trabajos, pero no la responsabilidad sobre los resultados esperados. El personal de mantenimiento debe estar comprometido con el objetivo buscado que, se reitera, consiste en eliminar la fuente de fallas en un determinado ítem.

Dentro de sus principales ventajas encontramos:

√ Si se realiza con personal de Planta, eleva la capacidad técnica y la autoestima del grupo.
√ Disminuye los gastos fijos en Mantenimiento porque, en ocasiones, se pueden eliminar rutinas preventivas de reparación o reemplazo periódico de elementos. Se desmitifica la costumbre de decir, *"esto siempre se hizo así"*.
√ Permite tener mayor grado de compresión técnica de las instalaciones, porque se revela información desconocida hasta el momento.

Sus principales desventajas:

√ En la medida que no se realice un estudio de factibilidad económica preciso, puede incurrirse en grandes gastos; sobre todo cuando la elección es realizarlo con personal y equipamiento propio. Desgraciadamente el personal propio sólo cuenta con la experiencia adquirida en su Planta; mientras que un especialista externo tiene una visión más amplia, obtenida al moverse en otras industrias e instalaciones.

√ Para los casos en que el diagnóstico no es acertado, se corre el riesgo de proponer como acción correctiva, directamente el rediseño. Esto podría ocasionar un gasto innecesario tanto por la propia investigación (no obtenemos lo que buscamos) como en modificaciones que no son necesarias.

Monitoreo Continuo

Finalmente están las situaciones tecnológicas que obligan a utilizar *monitoreos continuos*. Con este método, se obtiene gran caudal de información de la magnitud física medida. Es frecuente, por ejemplo, instalar sensores de velocidad y acelerómetros en máquinas rotantes cuyas fallas sintomáticas haya que identificar ni bien ocurren porque el intervalo Δt_{SF} es muy chico. El objetivo es que el intervalo $(E - S_i)$ tienda acero, figura 3.1.8. Esto permite que el estado paramétrico perdido (ΔE_i) sea mínimo. La identificación de la falla sintomática en un momento tan temprano, posibilita reprogramar las operaciones y/o a planificar a tiempo las acciones correctivas.

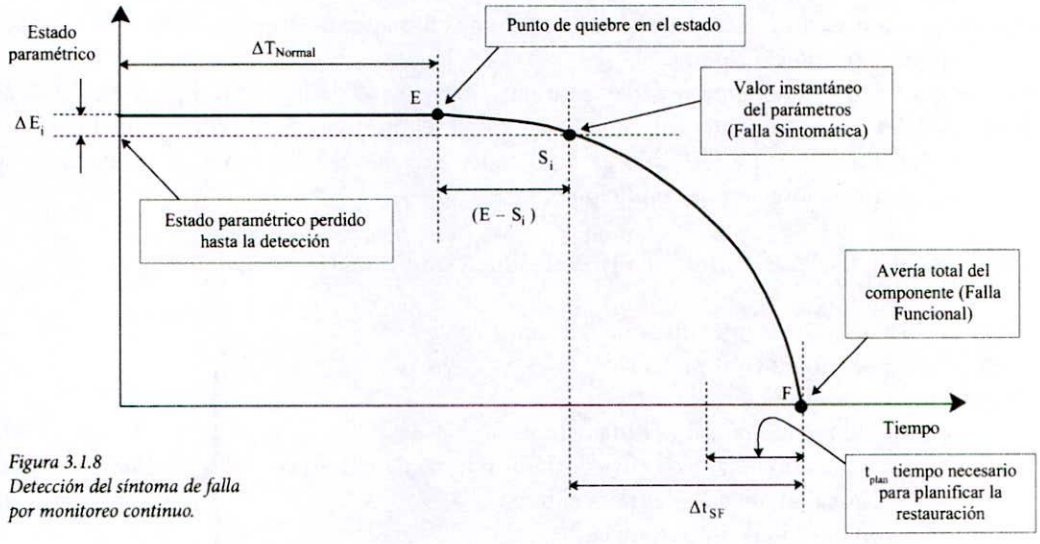


Figura 3.1.8
Detección del síntoma de falla por monitoreo continuo.

Se utilizan monitoreos continuos en instalaciones donde la avería funcional puede provocar efectos muy graves en seguridad, producción, o la integridad del activo (Ej. turbo generadores).

Una razón técnica para su aplicación es que el intervalo Δt_{SF} tenga alta dispersión, impidiendo un monitoreo periódico eficaz. También en los casos que existe poca linealidad entre el estado de deterioro y la variable medida (baja sensibilidad *propiedad - variable*). Por otra parte, si Δt_{SF} es pequeño, no pueden planificarse acciones de restauración ($\Delta t_{SF} \leq t_{plan}$). Aunque un monitoreo continuo obligue a detener la marcha del equipo, se podrán evitar daños mayores en otros elementos del sistema; aún cuando no se hayan iniciado las tareas de reparación.

Nota: Suele prestarse a confusión el hecho de saber qué actividad de mantenimiento, en rigor, representa un monitoreo continuo. Es conveniente, entonces, aclarar lo siguiente.

La acción de monitorear en forma continua cualquier variable representa claramente una rutina *condicional de monitoreo continuo*. La intención es evitar, bajo cualquier circunstancia, la falla operativa imprevista del elemento monitoreado. Sin embargo, la instalación encargada de medir la variable (grado de deterioro) constituye una protección *interruptiva o indicativa*[1] según sea el caso, a cuyos modos de falla pueden caberle una estrategia de Mantenimiento Detectivo.

Ejemplo 3.1.10

√ Los fallos que afectan el nivel vibratorio en ventiladores de gran envergadura, provocan problemas graves en forma repentina, por lo que se emplean sensores de vibración instalados en línea (continuos) para detener los equipos cuando se presenta tal situación.

√ Algunos sistemas de lubricación requieren el chequeo continuo del nivel de partículas ferrosas, por lo que se montan trampas o detectores magnéticos electrónicos que envían una señal de indicación y alarma al sistema de control cuando la concentración supera el valor límite.

√ La tecnología moderna de ultrasonido permite instalar de manera permanente sensores sonoros de alta frecuencia que identifican fugas internas en válvulas.

3.1.6 Rutas de Mantenimiento Condicional

Una vez definidas las variables físicas a controlar y su periodicidad, es necesario volcar dichas tareas en una Ruta de Mantenimiento (conocida también como *Hoja de Ruta Condicional*). Las rutas deben agruparse por especialidad. Así por ejemplo, habrá Rutas Condicionales para Análisis de Vibraciones, Termografía Infrarroja, puntos de muestreo para el control de aceites, etc. Cada Hoja de Ruta, y una vez alcanzada su fecha teórica de ejecución, emitirá en forma automática la Orden de Trabajo (OT) correspondiente (ver Sección 8.3 del Capítulo 8).

Únicamente vale la pena confeccionar estas Rutas para el caso de monitoreo periódico. Los chequeos discrecionales se instrumentan con una OT puntual según necesidad. De la misma forma, en el monitoreo continuo se emite una OT sólo para proceder a restaurar un posible desvío de la variable controlada (OT para Restauración de condición básica).

La información que debería incluir una Hoja de Ruta Condicional es la siguiente:

Datos generales o "de cabecera".

- √ Empresa, Sector y datos operativos de relevancia.
- √ Responsable de la medición y análisis.
- √ Fecha prevista de ejecución.
- √ Tiempo estimado para realizar la Ruta completa.
- √ Procedimiento general para la captura de datos o toma de muestras.
- √ Medidas de seguridad obligatorias para el trabajo.
- √ Algún otro comentario de importancia.
- √ Fecha y firma del ejecutante de las mediciones o muestreos.

Datos puntuales o "de ruta".

- √ Equipo al que pertenece el punto medido.
- √ Texto o descripción del punto (n°, marcación, etc.).
- √ Nota adicional para el punto (si es necesario).
- √ Variable física a medir.
- √ *Valor nominal* del parámetro de diagnóstico.
- √ *Valor de alerta* (si aplica).
- √ *Valor de alarma* o *valor límite*.
- √ Periodicidad (frecuencia) para realizar el control en cada punto.
- √ Acción recomendada en caso de anormalidades (alerta o alarma).

---

1 Ver "Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección", sección 5.1.1 Capítulo 5.

La periodicidad se considera aquí un *dato puntual* o *de ruta*, porque cada punto tendrá su propio intervalo de toma. La Hoja de Ruta Condicional completa debe incluir todos los puntos, cada uno con su frecuencia. Si embargo, la OT emitida contendrá sólo aquellos puntos cuyas fechas teóricas de ejecución coincidan al momento de su emisión. Este aspecto es netamente administrativo y dependerá del sistema informático vigente para la administración. El formato adoptado dependerá de la técnica. Por ejemplo, en la captura de datos para analizar niveles vibratorios, la misma estará seguramente contenida en el propio recolector de datos[1]. Sin embargo, una Ruta para extraer muestras de aceite puede incluirse simplemente en una planilla diseñada para tal fin. Ingeniería de Mantenimiento, encargada de confeccionar las Rutas, debe hacerse de toda esta información con rigor científico[2]. Para definir específicamente los valores *nominales*, de *alerta* o de *alarma*, pueden usarse distintas fuentes de información.

- √ Proveedores de los equipos (datos de buen funcionamiento).
- √ Personal independiente y especializado en la técnica de monitoreo escogida.
- √ Fabricantes de partes o componentes. (Rodamientos, filtros, lubricantes, etc.).
- √ Mediciones obtenidas durante la operación correcta del equipo.
- √ Normas y estándares para clasificar la severidad (ISO 2372, ISO 2373, etc.)
- √ Normativas legales en seguridad y protección del medio ambiente.

La finalidad es establecer el punto más allá del cual el equipo se considera en estado de falla sintomática (S_m) y que sugerirá la programación de trabajos de restauración. Resulta ventajoso ratificar las magnitudes con ensayos efectuados en los mismos equipos (monitoreo discrecional) cuando éstos operan satisfactoriamente. Si bien los fabricantes de equipos e instrumentos de medición pueden recomendar rangos de valores iniciales; conviene ajustarlos con la experiencia del personal de Planta y los datos de contexto operativo.

Aglutinación de Puntos

Durante la confección de una Ruta, es necesario ajustar la frecuencia de algunos puntos. Establecido el intervalo más eficaz para cada medición, las periodicidades son tan variadas que obligarían a emitir OT's casi diariamente; lo que no sería práctico ni económico. Para evitar esto, y *compactar* varios puntos en una misma Ruta, se altera (cuando es técnicamente válido) la frecuencia de algunos ítems. Es habitual hacerlo con técnicas poco invasivas como vibración y termografía, donde un aumento en la frecuencia de inspección no aumenta la probabilidad de falla; por el contrario, incrementa la posibilidad de identificar la falla sintomática amortiguando las fluctuaciones del intervalo Δt_{SF}.

El límite para tal compactación está dado por el costo de la técnica grupal y los beneficios marginales que de su aplicación se obtengan. Si bien es cierto que menores intervalos de inspección aumentan la probabilidad de detectar el síntoma, también es cierto que aumentan los costos totales. Siempre debe buscarse la mejor ecuación *costo - beneficio* integral.

Parámetros Generales y Singulares

Por último cabe mencionar que para algunas técnicas (por ejemplo análisis de aceites o de vibraciones), se pueden plantear Rutas con parámetros **singulares** y **generales**. Se comienza la extracción (recolección) y análisis por *puntos generales*. Éstos deberán reflejar el *estado total* del sistema. Luego, si se presenta un valor anormal, se realizan mediciones sobre aquellos puntos correspondientes a los parámetros *singulares* y necesarios para investigar el origen del desvío.

---

1 Ver sección 4.2 "Análisis de Vibraciones en tiempo y frecuencia", Capítulo 4.

2 En el Capítulo 8 "Administración y Programación del Mantenimiento", se completa el abordaje de la planificación del Mantenimiento Condicional.

Resumen de aplicación

3.1 Mantenimiento Condicional (Predictivo / Proactivo)

- *El Mantenimiento Condicional sugiere un plan de inspecciones basado en el monitoreo del estado de funcionamiento del equipo (o alguna de sus variables de proceso), para aprovechar al máximo su vida útil antes de intervenirlo o retirarlo de servicio.*

- *Con el Mantenimiento Predictivo medimos el deterioro progresivo de cada equipo por separado (o los síntomas prematuros de los defectos de sus partes) sin desarmes mayores, tiempo antes que se produzca la detención súbita.*

- *Las estrategias de diagnóstico basadas en el estado paramétrico, están tomando cada vez más protagonismo en la batalla contra las fallas, por su efectividad, confiabilidad y bajo costo integral.*

3.1.1 Alcance y Definición

- *El Mantenimiento Condicional persigue poner en evidencia, con la mayor anticipación posible, defectos, desvíos o síntomas de falla (fallas sintomáticas) que se manifiestan sobre las piezas o componentes de los equipos en funcionamiento antes de su falla funcional, con la ayuda de instrumentos o pruebas no destructivas, minimizando así el perjuicio sobre el servicio o la producción.*

- *Muchos síntomas de avería pueden descubrirse también a través de alteraciones en las propiedades de los productos que el equipo produce (controles de calidad ó control estadístico de proceso).*

- *El mantenimiento predictivo difiere del proactivo - ambos constituyen el mantenimiento a condición - por el carácter de reversibilidad o irreversibilidad que le confieren a las fallas sintomáticas. En el proactivo, el desvío de la condición normal (falla sintomática) es descubierto con más anticipación que en el predictivo, pudiéndose tomar acciones para desviar la tendencia natural hacia la falla funcional y evitar, en muchos casos, el reemplazo del elemento.*

3.1.2 Hipótesis y Condiciones de aplicación

- *Para aplicar mantenimiento condicional debe ser posible detectar alguna característica (variable) relacionada con el grado de deterioro del elemento.*

- *Cuando el estado paramétrico de la variable (deterioro) alcanza cierto valor, se dice que existe una Falla Sintomática (falla incipiente identificable). Cuanto antes pueda detectase el síntoma, más largo será el espacio de tiempo entre éste y la falla total de la función.*

- *El periodo Δt_{SF} define la fase final de la vida de un elemento; nada nos dice con respecto a su confiabilidad ni al tiempo que vivió saludablemente con anterioridad. Un intervalo Δt_{SF} amplio permite hacer los chequeos con menor frecuencia y/o que haya más tiempo para tomar la acción contingente que evite la consecuencia.*

- *Es imposible contar con la ley de variación para todas las magnitudes físicas y para todos los elementos. No sólo por la cantidad de parámetros existentes sino, además, porque cada uno adoptará distintas formas de acuerdo al contexto operativo. Esto obliga, en principio, a establecer un intervalo Δt_{SF} particular para cada caso.*

- *Son ejemplos de fallos sintomáticos, el daño incipiente en un rodamiento, las zonas calientes en el refractario de un horno, las fisuras o grietas que indican la fatiga de un material, la presencia de metales en el aceite de una máquina, la contaminación con agua de un aceite lubricante de motor, la reducción del espesor de pared en tubos, los puntos calientes en un circuito o en un tendido eléctrico, la falta de adhesión en materiales compuestos, el grado de oxidación de un aceite, etc.*

- *La magnitud de la variable (grado de deterioro), el intervalo Δt_{SF} y la técnica utilizada para el monitoreo, deben coincidir conceptualmente para garantizar la eficiencia del proceso.*

- *Algunas herramientas predictivas permiten intervalos Δt_{SF} más largos, pudiendo disminuirse la cantidad de inspecciones.*

3.1.3 Ventajas del Mantenimiento Predictivo

- *Ventajas principales: reducir los tiempos de parada no programada, seguir la evolución de una falla sintomática a lo largo del tiempo evitando llegar a la avería catastrófica, optimizar los recursos (mano de obra y materiales) programando las tareas correctivas o de restauración, aprovechar más cantidad de vida en equipos con periodos de vida útil prolongados o cuyo empeoramiento hacia la falla (3° y última etapa de la curva de la bañera) es progresivo (no prolonga la vida útil del componente, la aprovecha al máximo a través de la detección de la falla sintomática irreversible), ahorrar energía detectando fugas de calor en sistemas de calefacción o aislamiento, etc.*

- *Desventajas principales: las fallas sintomáticas bajo predictivo son de carácter irreversible, por lo que en rigor esta estrategia no es capaz de alargar la vida útil de los elementos inspeccionados.*

3.1.4 Mantenimiento Proactivo

- *Ciertas técnicas de monitoreo de condición son capaces de identificar fallas sintomáticas en forma muy prematura. Aprovechar la potencia tecnológica para poner de manifiesto anomalías muy anticipadamente, minimiza o impide el proceso de transformación de una causa raíz en una falla funcional.*

- *El Mantenimiento Proactivo surge como alternativa para anticiparse al momento en que una causa raíz de falla puede convertirse en una falla sintomática irreversible.*

- *Las tareas realizadas en mantenimiento proactivo son habitualmente de carácter investigativo.*

- *Son ejemplos de herramientas de mantenimiento proactivo: el análisis físico – químico de lubricantes, (oxidación, viscosidad, etc.), la alineación y balanceo de máquinas rotantes, el recuento de partículas contaminantes, la verificación de metales y aleaciones, etc.*

- *Beneficios del mantenimiento proactivo: Permite analizar la evolución de una falla sintomática reversible prácticamente desde la aparición de la causa raíz, provee información para trabajar sobre las causas y no sobre los efectos de los fallos, reduce los gastos provocados por las fallas sintomáticas irreversibles, ofrece un panorama muy acotado del estado de los componentes para decidir el momento más oportuno de su reemplazo o reparación, prolonga la vida de equipos en los cuales la causa raíz hubieran generado una falla sintomática irreversible, etc.*

3.1.5 Frecuencia de las Tareas Condicionales

Monitoreo Periódico

- *Un factor importante en la fijación de la frecuencia (t_{PR}) es el intervalo Δt_{SF}, en adelante Δt_{SF} primario o inicial. El intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$, es el periodo teórico entre la falla funcional y el máximo valor admitido para el síntoma, medido hacia atrás.*

- *En la mayoría de los casos el intervalo entre dos inspecciones a condición (t_{PR}), se estima directamente tomando la mitad (y en algunos casos un tercio) del intervalo $\Delta t_{SF\ primario}$.*

- *En las inspecciones a condición suelen fijarse dos valores; el primero denominado valor de alerta y el segundo, llamado valor de alarma.*

- *En equipos cuya avería funcional ocasiona graves perjuicios en seguridad, poniendo en riesgo la integridad física de personas o ambiente, los factores que afectan el t_{PR} deben ser respetados independientemente del valor que fue tomando históricamente la variable medida.*

Parámetro	Fórmula	Descripción / Aplicación
t_{PR}	$t_{PR} \approx \frac{\Delta t_{SF\ primario}}{2}$	*Intervalo entre inspecciones condicionales. Como herramienta de primera aproximación.*
t_{PRb}	$t_{PRb} = \Delta t_{SF\ primario} - 1{,}2 \times t_{plan}$	*Intervalo bruto entre inspecciones condicionales, considerando el tiempo de programación de las acciones de restauración (t_{plan}).*
f_{PR}	*Ver variables de estimación en el Capítulo*	*Factor de frecuencia para inspecciones a condición.*
t_{PR}	$t_{PR} = (\Delta t_{SF\ primario} - 1{,}2 \times t_{plan}) \times (1 - f_{PR}/100)$	*Intervalo entre inspecciones condicionales. Para estimaciones más rigurosas y para tener en cuenta el tiempo de planificación de las tareas de restauración (t_{plan}).*
t_{PR}	$t_{PR} \approx \Delta t_{SF\ primario} \times (1 - f_{PR}/100)$	*Intervalo entre inspecciones condicionales. Para estimaciones más rigurosas y cuando el tiempo de planificación es despreciable.*
t_{PR}	$t_{PR} = (\Delta t_{SF\ primario} - t_{plan}) \times (1 - f_{PR}/100)$	*Intervalo entre inspecciones condicionales. Para estimaciones más rigurosas y cuando el tiempo de planificación (t_{plan}) es significativo frente a $\Delta t_{SF\ primario}$.*
$MTBF_S$		*Tiempo medio entre fallas sintomáticas indentificadas.*
H		*Horizonte de evaluación económica.*
C_{PR}		*Costo de realizar por única vez la tarea a condición.*
C_{Rest}		*Costo de la restauración surgida de la detección de la falla sintomática.*
C_{ad}		*Costos adicionales, además de los de la restauración, si ocurre la falla funcional.*
C_{bm}		*Pérdida de beneficio marginal a consecuencia de la falla funcional.*
C_{TPR}	$C_{TPR} = C_{PR} \frac{H}{t_{PR}} + C_{Rest} \frac{H}{MTBF_S}$	*Costo total del mantenimiento condicional durante H.*
C_{Tff}	$C_{Tff} = (C_{Rest} + C_{ad} + C_{bm}) \frac{H}{MTBF_S}$	*Costo total de no realizar ninguna tarea de mantenimiento condicional durante H.*

- *La comparación económica debe cotejar las siguientes dos expresiones:*

$$\frac{C_{PR}}{t_{PR}} \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{(C_{ad} + C_{bm})}{MTBF_S}$$

- *La estimación de $MTBF_S$ asume que siempre su manifestación conducirá indefectiblemente a una falla funcional, si nada se hiciese para prevenirla.*

Monitoreo Discrecional

- *Un monitoreo discrecional se aplica fundamentalmente como apoyo para investigar y resolver problemas crónicos. También para el seguimiento de un equipo en su etapa temprana de asentamiento, o en la parte final de su servicio. Los chequeos discrecionales requieren de mucha experiencia técnica. Los costos para investigar una causa (a igualdad de tecnología), son mayores que en el monitoreo periódico, pues habrá más mediciones, captura de datos y análisis; también más cantidad de insumos y materiales.*

- *Los principales motivos por los cuales se suele implementar un monitoreo discrecional son: por combinación de tareas para modos de falla con graves consecuencias (cuando es técnicamente posible) o para analizar causas raíz de fallas específicas (tareas de investigación).*

Monitoreo Continuo

- *Con un monitoreo continuo se obtiene gran caudal de información de la magnitud física medida.*

- *Se aplica en esquemas operativos cuyas fallas sintomáticas haya que identificarlas ni bien ocurren porque el intervalo Δt_{SF} es muy chico.*

3.1.6 Rutas de Mantenimiento Condicional

- *Las rutas deben agruparse por especialidad. Así por ejemplo, habrá Rutas Condicionales para Análisis de Vibraciones, Termografía Infrarroja, puntos de muestro para el control de aceites, etc.*

- *La periodicidad se considera un dato importante, porque cada punto tendrá su propio intervalo de toma. La Hoja de Ruta completa debe incluir todos los puntos, cada uno con su frecuencia.*

Aglutinación de Puntos

- *Establecido el intervalo más eficaz para cada medición, las periodicidades son tan variadas que obligarían a emitir OT's casi diariamente; lo que no sería práctico ni económico. Para evitar esto, y compactar varios puntos en una misma Ruta, se altera (cuando es técnicamente válido) la frecuencia de algunos ítems. Es habitual hacerlo con técnicas poco invasivas como vibración y termografía, donde un aumento en la frecuencia de inspección no incrementa la probabilidad de falla; por el contrario, aumenta la posibilidad de identificar la falla sintomática amortiguando las fluctuaciones del intervalo Δt_{SF}.*

Parámetros Generales y Singulares

- *Para algunas técnicas (ej.: análisis de aceites o de vibraciones), pueden plantearse Rutas con parámetros singulares y generales.*

Capítulo 4

Técnicas de Mantenimiento Condicional

Si no conviene, no lo hagas; si no es verdad, no lo digas[1].

---

1 Marco Aurelio (121 - 180).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Establecer programas de Mantenimiento Condicional fundamentados en la interpretación de sus ventajas y limitaciones.
- √ Orientar un plan de Mantenimiento Condicional hacia la máxima eficacia y eficiencia global.
- √ Conocer los fundamentos físicos básicos que rigen el análisis de señales vibratorias.
- √ Seleccionar puntos de medición y confeccionar rutas de monitoreo por vibraciones para equipos rotantes.
- √ Conocer las leyes físicas que rigen la transmisión del calor por radiación y entender el principio de funcionamiento de las cámaras termográficas.
- √ Identificar fallas sintomáticas aplicando termografía infrarroja y trazar rutas de inspección para esta tecnología.
- √ Comprender los factores básicos que afectan la lubricación de máquinas y las propiedades más importantes de los lubricantes.
- √ Identificar los principales contaminantes de un aceite industrial y las consecuencias que tienen en el tribosistema. Entender el proceso de degradación de un lubricante.
- √ Alcanzar un mínimo nivel de comprensión de los análisis de aceite usado y proponer límites de alerta y alarma. Identificar ciertas fallas sintomáticas (reversibles o irreversibles).
- √ Implementar planes de mantenimiento proactivo de análisis de aceites, proponiendo puntos de muestreo, frecuencias, tipos de parámetros sensibles, límites de alerta y alarma, etc.
- √ Entender los principios físicos y de aplicación de otras técnicas condicionales menos divulgadas.
- √ Especializarse en la utilización de las herramientas predictivas y proactivas aquí propuestas.
- √ Perfeccionar rutas de Mantenimiento Condicional.

Índice de Contenidos

4.1 Técnicas de Mantenimiento Condicional

4.2 Análisis de Vibraciones en tiempo y frecuencia
- Fundamentos
- Diagramas de Espectro (Dominio de las frecuencias)
- Instrumentos de Medición
- Geometría de las Mediciones
- Diagnóstico
- Valores de Operación y Diagnóstico (Nominal, Alerta y Alarma)
- Consideraciones y Recomendaciones Finales

4.3 Termografía Infrarroja
- Alcance y objetivos de la Termografía Infrarroja
- Transmisión del Calor
- Espectro Electromagnético
- Radiación Térmica
- Cámaras para Termografía (principio de funcionamiento)
- Ventajas y Desventajas de la Termografía Infrarroja
- Aplicaciones y Diagnóstico
- Recomendaciones para programar una Ruta de Termografía

4.4 Tribología y Análisis de Aceites
- Alcance de los Análisis de Aceite
- Objetivos y Fallas Sintomáticas
- Introducción a la Lubricación
- Formulación y clases de Lubricantes
- Aditivos
- Análisis Tribológico (Base + Aditivo + Máquina + Medio)
- Parámetros Específicos de Diagnóstico
- Ensayos sensoriales de campo
- Precauciones durante el muestreo
- Grasas Lubricantes
- Manejo y almacenamiento de Lubricantes

4.5 Otras Técnicas Condicionales
- Los Sentidos Humanos
- Estetoscopía Industrial
- Emisión Acústica
- Prueba Hidráulica y Neumática
- Ultrasonido (por excitación Natural)
- Ultrasonido (por excitación de Eco Ondas)
- Tintas Penetrantes
- Partículas Magnéticas
- Radiografía Industrial
- Extensometría (Strain Gauges)
- Boroscopía Industrial
- Análisis de Motores Eléctricos
- Ensayo de Impedancia en Baterías
- Análisis de Gases de Combustión
- Alteración en los parámetros de Calidad del Producto

Resumen de aplicación

Anexos Relacionados
- Anexo II: Valor Eficaz ó RMS
- Anexo III: Estándares y Especificaciones útiles para Vibraciones Mecánicas
- Anexo IV: Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas
- Anexo V: Clasificación AGMA para lubricantes de transmisión

4.1 Técnicas de Mantenimiento Condicional

Siempre resulta útil que el personal de Mantenimiento sea capaz de interpretar y diagnosticar los resultados obtenidos a partir de informes predictivos o proactivos. Es conocida la expresión que un ingeniero de mantenimiento debe ser *trilingüe*; vale decir, manejar con suficiente solvencia el monitoreo de máquinas y equipos a través de *Análisis de Vibraciones, Termografía Infrarroja* y *Análisis de Aceites usados.*

Una vez definida la necesidad de monitorear la falla sintomática en su estado prematuro (antes que se transforme en una falla funcional), se requiere seleccionar la herramienta que mejor se ajuste para su detección. El diagnóstico tendrá que incluir la estimación del tiempo remanente de utilización para el activo (con la mayor precisión) y la identificación de la causa raíz de falla (con la mayor certeza).

El objetivo de este Capítulo es introducir al lector en las herramientas tecnológicas más importantes para identificar **fallas sintomáticas** en instalaciones industriales. Se pretenden cubrir los fundamentos básicos teóricos y ofrecer, además, un enfoque sistémico, didáctico y de aplicación práctica. Sin embargo, se recomienda consultar bibliografía especializada cuya referencia se brindará oportunamente.

En la sección 4.5 se presentan brevemente otras metodologías adicionales y vigentes para el control y seguimiento de fallas incipientes.

4.2 Análisis de Vibraciones en tiempo y frecuencia

Las máquinas en movimiento, aún en su estado normal, manifiestan efectos dinámicos que emiten energía. Esta energía se pone en evidencia a través de ondas que, a su vez, provocan vibración periódica, ruido (emisión acústica) o pulsos repetitivos. El nivel vibratorio normal e inherente de un equipo puede verse afectado por la presencia de defectos, daños o síntomas de falla en alguna de sus partes. Cuando esto sucede, la vibración puede alcanzar magnitudes elevadas poniendo en peligro su integridad. Las altas vibraciones generan desgaste prematuro, fisuras, fatiga y rotura de rodamientos, sellos, componentes, etc. Consecuentemente, las vibraciones resultan de la acción y reacción de fuerzas externas e internas del sistema. Cuando la máquina sufre deterioro en alguna de sus partes, las fuerzas aumentan su intensidad provocando variación en los niveles de vibración. Aprovechando este efecto muchos problemas (fallas sintomáticas) de equipos rotantes pueden identificarse con la técnica de **Análisis de Vibraciones**.

Las fallas sintomáticas deben ser **parámetros de salida identificables** y, además, debe existir una relación **sensible**[1] entre la magnitud del parámetro y el grado de deterioro del componente (defecto). La relación mencionada *(magnitud del parámetro medido - estado del componente)* es importante si se propone un *mantenimiento condicional* pues representa el nivel de degradación de las variables estructurales del sistema bajo estudio. Resulta imprescindible, entonces, establecer con anticipación los parámetros de salida que mejor representen el *estado funcional* del equipo como, así también, sus *límites cuantitativos*.

4.2.1 Fundamentos

Una vibración se produce por el movimiento oscilatorio (generalmente de pequeña amplitud y alta frecuencia) de una masa a través de un punto de equilibrio. Supóngase por caso un conjunto simple masa - resorte como el esquematizado en la figura 4.2.1. La masa *m* en movimiento ascendente y descendente según el sentido indicado, adopta su valor mínimo y máximo de desplazamiento en los puntos p_{min} y $p_{máx}$ respectivamente.

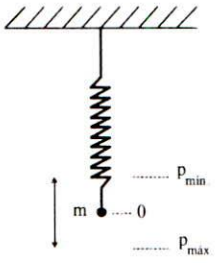


Figura 4.2.1
Conjunto simple masa - resorte.

El movimiento entre los límites p_{min} y $p_{máx}$ hace que la masa *m* adquiera cierta velocidad y aceleración, magnitudes que, a su vez, adoptarán valores máximos y mínimos. Obsérvese el defasaje entre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Cuando el desplazamiento es cero (posición O de equilibrio), la velocidad toma su máximo valor y cuando el desplazamiento es máximo la velocidad es cero. Por su parte, la aceleración se encuentra desfasada π (180°) con respecto al desplazamiento; ambos son cero en el punto de equilibrio y adquieren su máximo en p_{min} y $p_{máx}$, sólo que con signos opuestos.

Si el movimiento oscilante de la masa alrededor del punto central se grafica en función del tiempo, se obtiene una función senoidal periódica simple como ilustra la figura 4.2.2.

---

1 Ver Nota en "Monitoreo Discrecional" de la sección 3.1.5, Capítulo 3.

El máximo valor de una señal de vibración (independientemente del dominio) se denomina amplitud. La **amplitud** (**A**) en el desplazamiento se mide *"pico a pico" (pK-pK)*, mientras que en velocidad y aceleración suele usarse el *"cero a pico" (0-pK)* ó RMS dependiendo el objetivo del análisis.

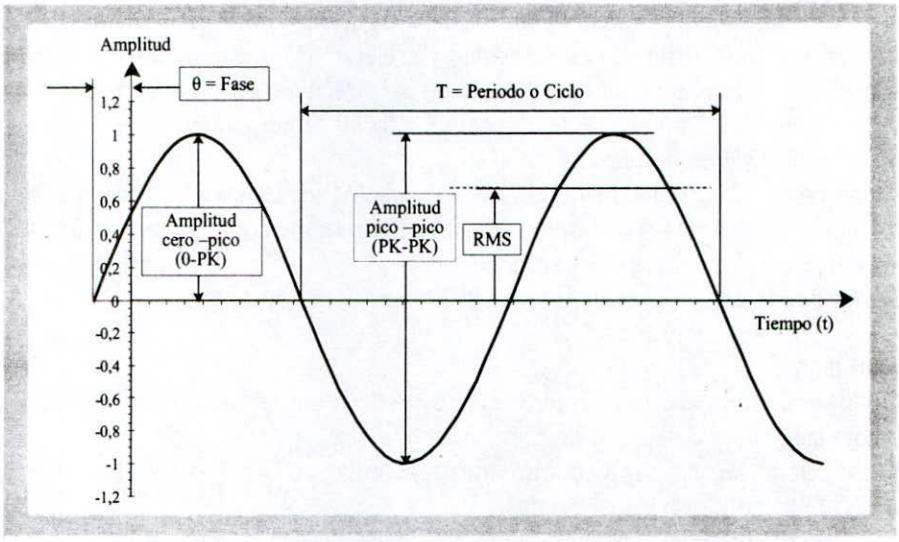


Figura 4.2.2 Parámetros y características de una onda senoidal simple.

El **periodo** (**T**) es el tiempo transcurrido entre dos puntos repetitivos y consecutivos de una onda periódica, dentro del cual los sucesos físicos se reiteran. A su vez, la inversa del periodo es la **frecuencia** (f = 1/T) e identifica la cantidad de periodos por unidad de tiempo.

La **fase** es una magnitud relativa que denota el adelanto o retardo que tiene una onda respecto a una referencia (figura 4.2.2). Además, el defasaje temporal (medido en grados) entre dos señales (tomadas en puntos diferentes del equipo) indica el nivel vibratorio relativo que tiene una parte de la máquina con respecto a otra (figura 4.2.3). La fase es una característica relevante en el diagnóstico de causas raíz de falla, como se verá posteriormente.

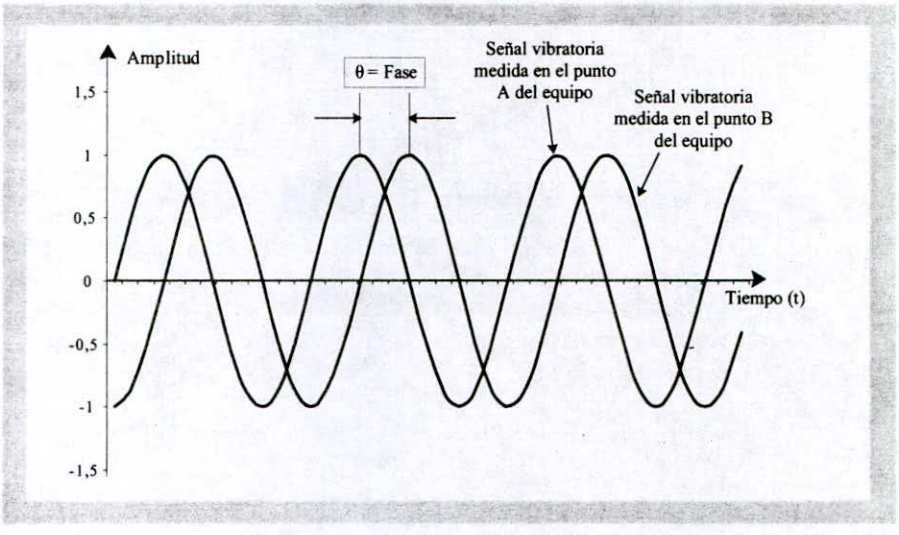


Figura 4.2.3 Fase entre señales senoidales periódicas medidas en dos puntos diferentes (A y B) de un mismo equipo.

Obsérvese que las dos señales corresponden a mediciones realizadas en diferentes puntos de un mismo equipo, lo cual ratifica que ambas partes vibrarían de modos diferentes.

El *valor eficaz* **RMS**[1] (Root Mean Square) es muy útil para medir amplitud (severidad de la falla sintomática). Los equipos de recolección de datos pueden calcular directamente el valor RMS de una señal vibratoria para determinado periodo de tiempo *t*, a través de algoritmos matemáticos. El valor RMS es una magnitud *escalar* (muy utilizado en velocidad y aceleración) que brinda un panorama inicial del estado de gravedad de la máquina, siempre que el rango de frecuencia sea el mismo para todas las mediciones. Es una medida de la "potencia" de la señal vibratoria. Aunque menos frecuentemente, también puede usarse el valor RMS en desplazamiento.

En ocasiones resulta de utilidad medir el *valor medio* (**VM**) de la señal rectificada durante un periodo *t*. De las magnitudes anteriores se desprenden otros dos parámetros como son, el *factor de forma* (**FF** = RMS/VM) y el *factor de cresta* (**FC** = *pK*/RMS).

Las unidades de medida más utilizadas para estos parámetros resultan ser:

√ Amplitud (**A**):
- Desplazamiento *"pico-pico"*: micrones (1 μ = 0,0001 cm.) ó mils (1 mils = 0,001 in)
- Velocidad *"cero-pico" (pK)* ó *RMS*: mm/seg ó in/seg
- Aceleración *"cero-pico" (pK)* ó *RMS*: mm/seg^2, in/seg^2 ó G (1 G = 9.800 mm/seg^2)

√ Periodo (**T**): Segundos ó milisegundos.
√ Frecuencia (**f**): cpm (ciclos por minuto) ó Hz (Hertz); (1 Hz = 1 ciclo/seg = 60 cpm)
√ Fase (**θ**): Grados.

Las figuras precedentes corresponden a señales periódicas simples. En realidad, las máquinas rotantes, actuando en sus contextos operativos, producen señales vibratorias de mayor complejidad debido al aporte de cada una de sus partes mecánicas. La figura 4.2.4 muestra la composición (**señal compleja**) de dos señales periódicas simples, cada una con amplitudes y frecuencias distintas. Obsérvese que la señal de menor amplitud y mayor frecuencia se monta sobre la señal de mayor amplitud y menor frecuencia (portadora). El resultado de tal combinación (suma vectorial) se aprecia en 4.2.4 c.

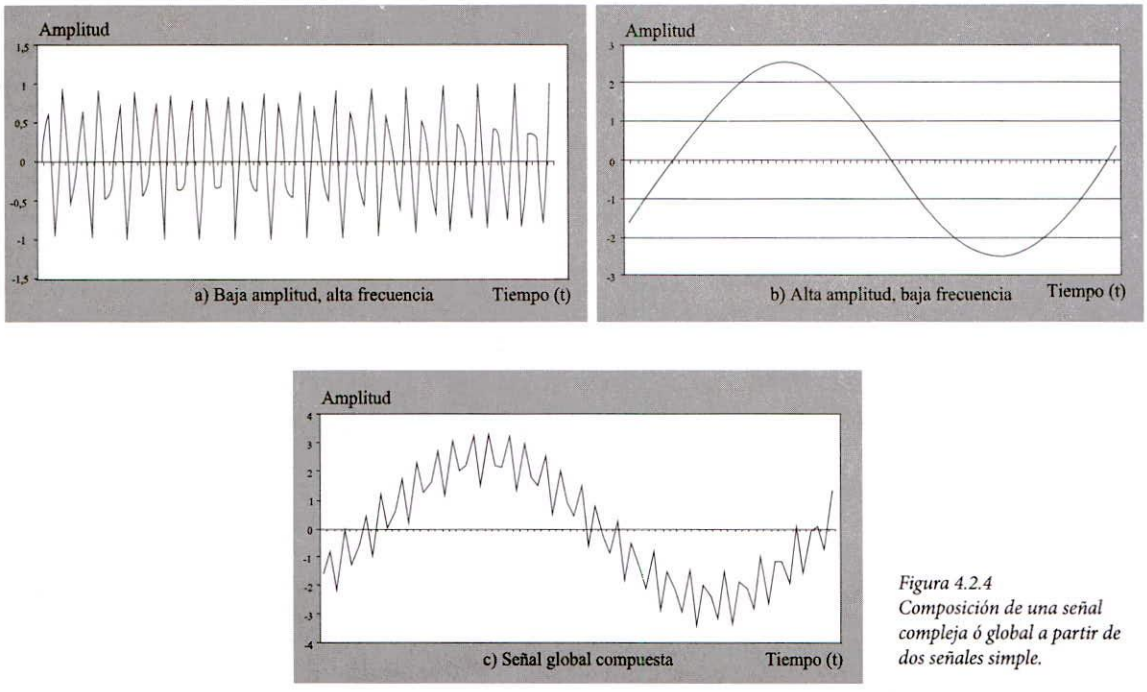


Figura 4.2.4
Composición de una señal compleja ó global a partir de dos señales simple.

1 Ver Anexo II, "Valor eficaz ó RMS".

Cada parte individual de la máquina en movimiento vibra con una amplitud y una frecuencia específica. Pero cuando *miramos* al equipo (con un sensor de aceleración, por ejemplo) desde un mismo punto, *"vemos"* solamente la *señal compleja*. Esta señal es el resultado de combinar todas las señales individuales simples de cada parte. A esto se denomina también medición global o directa en el dominio del tiempo, e indica el comportamiento total del sistema *visto* desde el punto en que se efectúa la lectura. Por tanto, y si bien la medición pertenece a un rango de frecuencia previamente establecido, en ningún caso es posible de esta manera identificar la frecuencia de cada componente vibrante del sistema.

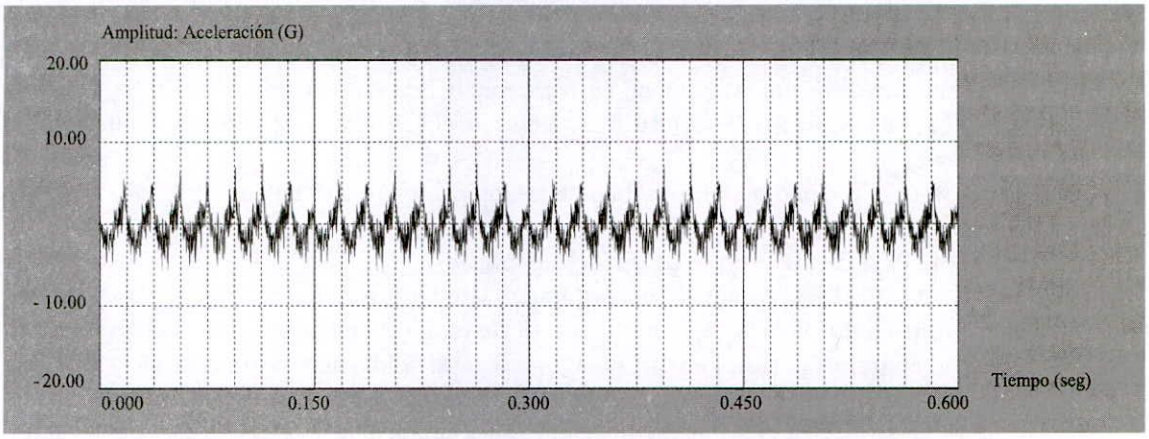


Figura 4.2.5
Medición global o señal compleja de aceleración en el dominio del tiempo.

La recolección y monitoreo de señales globales permite seguir la evolución del estado vibratorio total de un equipo. Se requiere escasa capacitación del personal y constituye un método rápido de evaluación general. Se fundamenta en la presunción de que a mayor valor global (escalar) mayor gravedad del problema. Su aplicación es sencilla y económica pero, lamentablemente, tiene inconvenientes debido a que sólo brinda un panorama general del estado total de vibraciones. No es posible monitorear el nivel de deterioro de cada parte ni determinar la causa del problema.

Una máquina está compuesta por varios elementos, cada uno con masas diferentes. Esto hace que los elementos de mayor masa produzcan vibraciones de mayor amplitud que los de menor masa. Simultáneamente, los elementos de menor masa tienen mayores frecuencias de vibración.

Por ejemplo, las bolas de un rodamiento pasan por la pista varias veces por revolución del eje. De manera que si se produjese un daño en la pista, ésta sería impactada por las bolas varias veces por vuelta. Es decir que la frecuencia de tal evento sería mucho mayor que la frecuencia de rotación o rpm del sistema. Los eventos de baja frecuencia (por ejemplo un rotor o eje desbalanceado) emiten mayor energía vibratoria. Si el análisis se realiza exclusivamente midiendo la magnitud global de la señal, puede ocurrir que pequeños valores de energía pasen desapercibidos cuando en realidad pueden ser muy severos.

Existen instrumentos económicos y de fácil manejo para medir el valor global de la vibración (lápices con indicación digital). Miden RMS o valor pico (pK) en velocidad o aceleración y para un ancho rango de frecuencias. Algunos están provistos sencillamente de pre-seteos pasa-altos para *mirar* exclusivamente altas frecuencias, logrando resultados aceptables cuando se combina la medición del valor RMS con el valor (pK). En ciertos casos es posible seleccionar el rango de frecuencia brindando la posibilidad de *ver* problemas tanto en altas como en bajas frecuencias. Sin embargo, con este método es difícil conocer con exactitud la causa raíz de la falla incipiente, precisamente porque se trata de una magnitud escalar que desatiende la frecuencia del evento.

La medición del *valor global* de una señal vibratoria en el dominio del tiempo es un *parámetro general*[1]. Aunque cada vez en menor escala, suelen confeccionarse rutas sólo para el monitoreo de valores globales y ante la evidencia de una magnitud fuera de lo normal, se procede al estudio de los *parámetros singulares.*

Ejemplo 4.2.1
Supóngase el caso de una bomba centrífuga de gran caudal que sufre un problema de cavitación y, además, en uno de sus rodamientos se está desarrollando una falla sintomática sobre la pista interior. Supóngase, también, que la medición del valor global se realiza precisamente cuando se produce el evento de turbulencia (fenómeno con alto nivel vibratorio), por lo que se solicita ajustar las variables del proceso y se elimina el problema. Sin embargo, la falla sintomática en el rodamiento (de bajo nivel vibratorio), y que es *empañada* por la componente de mayor energía, pasa desapercibida. Con el tiempo es muy probable que las consecuencias del daño incipiente en el rodamiento sean mayores que las producidas por la cavitación.

Veamos a continuación como se trabaja actualmente con parámetros singulares.

4.2.2 Diagramas de Espectro (Dominio de las frecuencias)

La figura 4.2.5 exhibe una señal compleja (poliarmónica) temporal y aleatoria de cierta máquina obtenida a partir de una medición de aceleración y para cierto rango de frecuencias. Es interesante notar que la complejidad en su forma radica en que no es una señal senoidal pura porque encierra todas las fuentes generadoras de vibración. Los componentes de una cadena cinemática en movimiento rotatorio generan, aún en estado normal de operación, vibraciones en frecuencias específicas. Cuando surge un daño, éste excita tales vibraciones llevando los valores (amplitudes) a niveles mayores. La excitación puede producirse por infinidad de razones y causar daños que a futuro provocarán un deterioro aún mayor en el equipo. Los eventos que emiten mayor energía vibratoria se presentan en baja frecuencia (eje torcido, desalineación, desbalanceo, problemas estructurales, etc.), mientras que los de menor energía ocurren, casi siempre, a frecuencias mayores (daños en cojinetes anti-fricción, engranajes, motores eléctricos, cavitación en bombas, etc.). Las señales causadas por vibraciones de mayor energía presentan una frecuencia cercana (o igual) a la de rotación de la máquina. Además, pueden aparecer frecuencias de excitación a 2, 3, 4, etc. veces las rpm del eje rotante que se llaman armónicas (2X, 3X, 4X, etc.).

Las *frecuencias* vibratorias específicas de los elementos nos ayudan a comprender el *origen* del problema; mientras que la *amplitud* nos provee indicios de la *gravedad* del mismo.

Es evidente, entonces, que con el análisis de las señales vibratorias en el dominio del tiempo es imposible establecer las frecuencias a las que ocurren los eventos (causa del síntoma). Por este motivo se hace uso del método conocido como FFT (iniciales en ingles de Transformada Rápida de Fourier[2]).

Fourier descubrió que cualquier curva de vibración compleja en función del tiempo puede ser descompuesta en un conjunto de curvas sinusoidales simples (cada una con su frecuencia y amplitud). Dentro del analizador de espectro se descompone electrónicamente la señal compleja en el dominio del tiempo en varias señales simples pero en función de la frecuencia, pasando así del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Los equipos modernos de analizadores de espectro capturan la señal global proveniente del senso-transductor, calculan las series que forman la señal global y muestran de manera individual las señales simples en función de la frecuencia. Las curvas de amplitud en función de la frecuencia se denominan **espectros**. Analizar un espectro consiste en interpretar un hecho físico acontecido en una máquina rotante. La figura 4.2.6 describe gráficamente el concepto de la transformada rápida de Fourier.

---

1 Ver "Parámetros Generales y Singulares" en la sección 3.1.6, Capítulo 3.
2 Jean Baptiste Fourier (1768-1830) matemático francés creador del método de transformación que lleva su nombre.

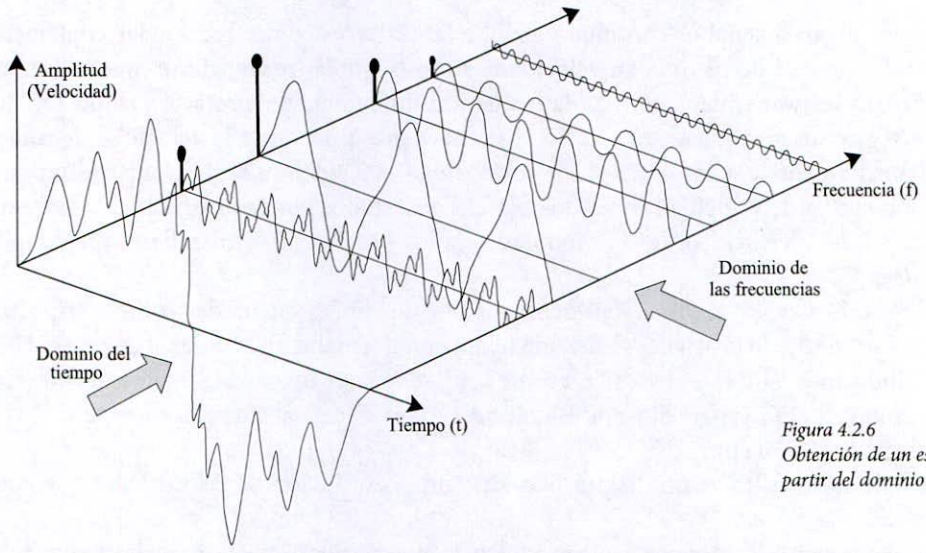
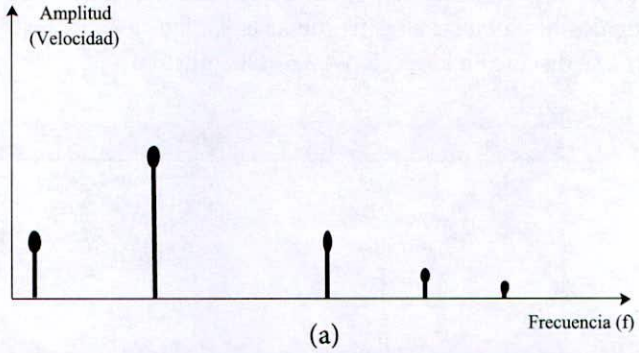


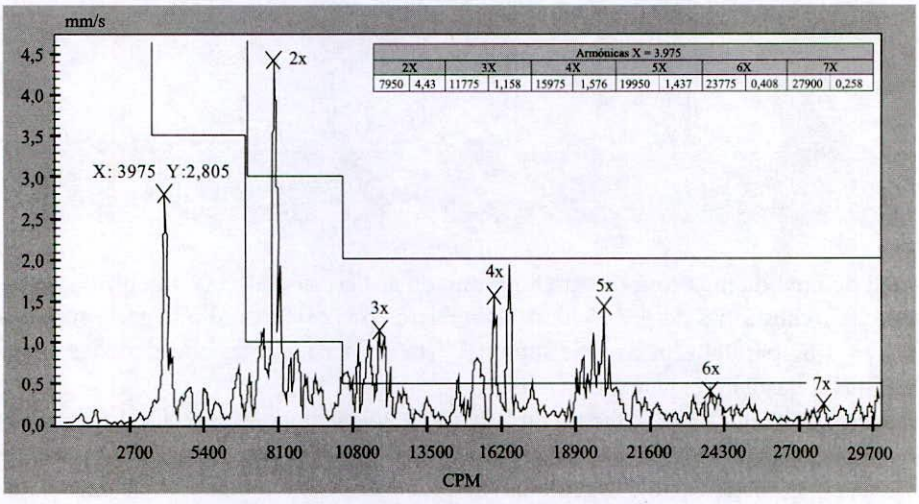
Figura 4.2.6
Obtención de un espectro a partir del dominio del tiempo.

Si se observa la figura anterior teniendo en cuenta únicamente la amplitud (velocidad) en función de la frecuencia, se tiene un espectro de velocidad (dominio de la frecuencia). El rango de frecuencia escogido para el análisis depende de la velocidad de rotación de la máquina.

A continuación se presentan dos espectros, uno ideal a partir del gráfico anterior (figura a) y otro real (figura b) proveniente de una lectura hecha en campo sobe una máquina rotante.



(a)



(b)

Figura 4.2.7
Espectro ideal (a) y espectro real (b).

Es conveniente hacer algunas consideraciones referidas al espectro real de la figura 4.2.7 b que ayudarán a comprender el análisis espectral de ahora en más.

En primer lugar la señal es continua y exhibe tantos *picos* como frecuencias contenga el registro vibratorio[1]. La unidad de medida en velocidad es mm/seg y la frecuencia se muestra en cpm (ciclos por minuto). El software marca con "X" la frecuencia fundamental de rotación como 1X (3.975 cpm y 2,805 mm/seg) y sus armónicas, 2X,...., 7X. Esto hace presumir que a la velocidad de rotación (4.000 rpm aproximadamente), la amplitud pK de la velocidad es 2,805 mm/seg. En la parte superior hay una tabla con los valores de velocidad (referidos a la 1X) alcanzados por cada armónica y su frecuencia. Por ejemplo, la 3X de la velocidad de rotación ocurre a los 11.775 cpm y manifiesta una amplitud pK de 1,158 mm/seg.

Los rangos de alerta y alarma (representados por dos líneas quebradas sobre el espectro) marcan los valores por debajo de los cuales el sistema opera con normalidad. Si la señal en velocidad sobrepasa los límites indicados para este caso, se presume la existencia de una avería incipiente. Obsérvese que la segunda armónica (2X) supera el valor establecido como alarma alcanzando un valor de velocidad de 4,43 mm/seg a los 7.950 cpm[2].

Lo narrado no constituye un diagnóstico, sino una descripción de las variables que gobiernan un espectro típico.

Sabiendo que ciertos problemas ocurren a frecuencias específicas puede establecerse una relación entre la frecuencia y la parte del equipo o efecto físico manifiesto. El desbalanceo, por ejemplo, provoca su máxima amplitud en velocidad a 1X; es decir, a la velocidad de rotación del eje (1X = 1 x rpm en CPM ó Hz). Así, estableciendo límites adecuados para el seguimiento de la amplitud en cada frecuencia, pueden definirse *parámetros singulares* de salida para descubrir fallas sintomáticas.

No sólo es posible obtener espectros de velocidad. La lectura de la aceleración de una vibración también puede representarse en función de la frecuencia. Se denominan *espectros de aceleración* y permiten observar eventos producidos hasta en las altas frecuencias. La figura 4.2.8 ilustra un espectro típico de aceleración cuyo síntoma se discute en la sección 4.2.5 "Diagnóstico".

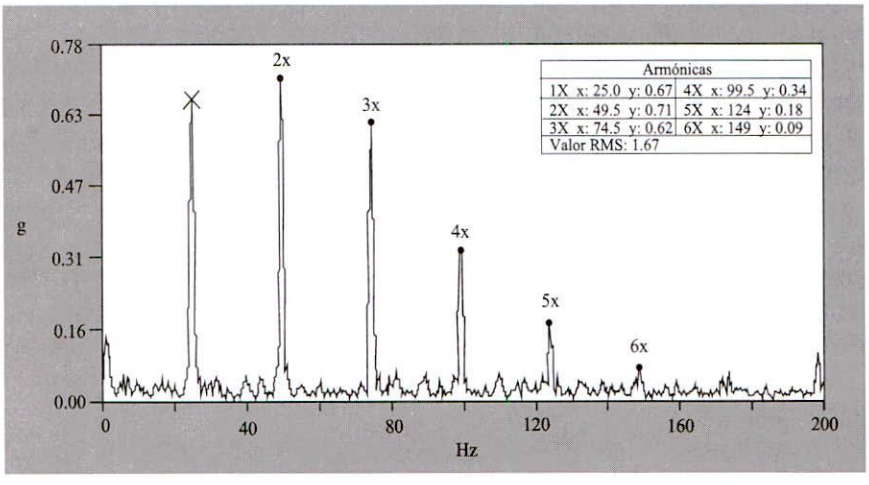


Figura 4.2.8 Espectro típico de aceleración.

La unidad de medida más común para amplitud en aceleración es el G, mientras que la frecuencia, generalmente por cuestiones de practicidad, se muestra en Hz (Hertz). En la parte superior se incluye el valor RMS = 1,67 para el espectro. Se suman a esta información las coordenadas de aceleración y frecuencia (G; Hz) hasta la sexta armónica (6X).

Otro espectro de aceleración se ilustra en la figura 4.2.9. Se pueden apreciar dos señales superpuestas. El trazo superior con picos de mayor amplitud corresponde a una medición con fecha 11/08/2005. En la ocasión, el diagnóstico arrojó "problema incipiente en rodamientos". A raíz de ello los rodamientos fueron sustituidos y, con fecha 13/10/2005, se volvió a efectuar una lectura obteniéndose la señal inferior que casi se confunde con el eje de la frecuencia a partir de los 5 kHz.

---

1 Evelio Palomino Marín. "La Medición y el Análisis de Vibraciones en el diagnóstico de Máquinas Rotatorias", Cuba 1997. Se recomienda consultar la obra mencionada.

2 Ver "Valores de Operación y Diagnóstico (Nominal, Alerta y Alarma)", punto 4.2.6 de esta sección.

Obsérvese la mejora sustancial en el valor global de la señal vibratoria (tabla mostrada en el ángulo superior derecho). El parámetro RMS (en G) pasó de 2,77 a 0,16 luego del cambio de rodamientos. La energía total emitida por la señal disminuyó considerablemente.

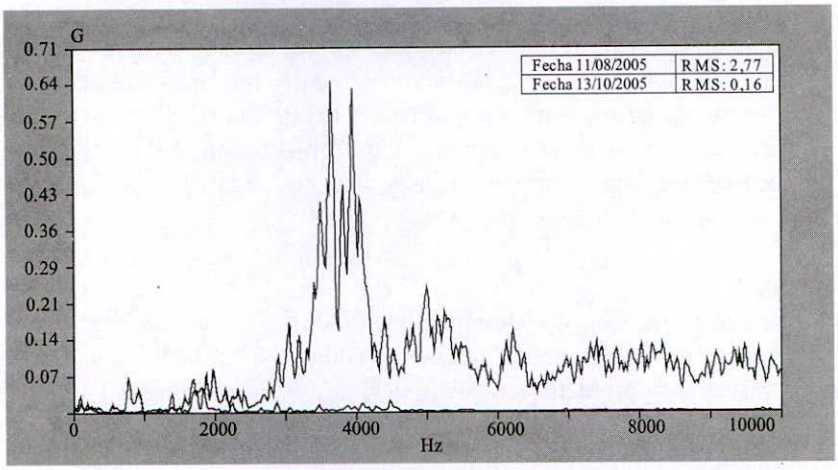


Figura 4.2.9 Espectro típico de aceleración.

Los espectros suelen graficarse en cascada para mostrar la evolución de la medición. Cada curva corresponde a una fecha de lectura diferente.

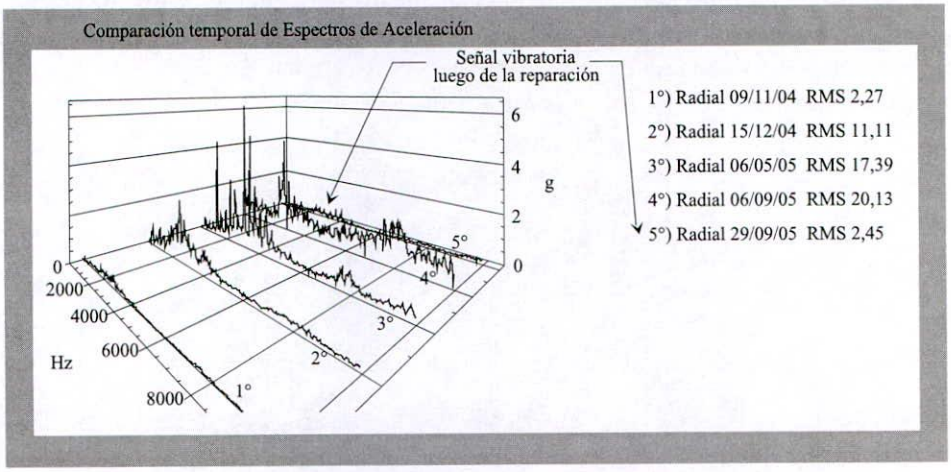


Figura 4.2.10 Espectro de Aceleración en cascada temporal.

La figura 4.2.10 ilustra una secuencia de 5 mediciones que permiten verificar la evolución del deterioro de un rodamiento. Nótese la relación entre el espectro de cada curva (acumulación de crestas) y el valor respectivo RMS. La curva más alejada hacia el fondo, es la lectura después de efectuar la sustitución del rodamiento.

4.2.3 Instrumentos de Medición

Una máquina en movimiento vibra, y la vibración emitida posee desplazamiento, velocidad y aceleración. El hecho consiste en "llevarnos una muestra" del estado vibratorio de la máquina para un determinado punto y generar los espectros. Los instrumentos de medición apoyados o montados adecuadamente en distintos lugares del equipo, "copian" o recolectan la señal vibratoria transfiriendo los datos a un analizador de espectros. Para un análisis posterior, es preferible transferir estos datos a un software y convertirlos en información más ordenada.

Un senso-transductor es un instrumento provisto de electrónica que transforma un parámetro físico en una señal eléctrica. El sensor apoyado sobre la máquina vibra solidariamente con ésta y toma los datos (velocidad y aceleración) para medir y representar la señal. Según lo visto en el dominio de la frecuencia (FFT), muchas fallas sintomáticas es preciso detectarlas por medio de características como velocidad o aceleración, dada su alta frecuencia. Los instrumentos de medición actuales (acelerómetros) poseen circuitos de procesamiento e integración electrónica que proveen simultáneamente valores de velocidad y desplazamiento a partir de las lecturas realizadas en aceleración.

Escapa al alcance de este trabajo el estudio de la lógica interna de sensores, instrumentos de medición y aparatos de campo; sólo se menciona superficialmente su funcionamiento.

Sensores de Desplazamiento

También denominados de *recorrido sin contacto*, miden en unidades *pico a pico* (pK-pK) la distancia recorrida por el elemento vibratorio según el método de corrientes parásitas (eddy current probe). Tienen muy buena respuesta en bajas frecuencias (0 a 1 kHz). Son de difícil montaje (requieren de alimentación eléctrica adicional) y determinan la distancia relativa entre dos superficies. Sirven para establecer, sin contacto, el desplazamiento de un eje en toda su órbita y la vibración relativa. Su uso es apropiado en máquinas de bajas revoluciones.

Sensores de Velocidad

El campo de aplicación abarca frecuencias de entre 10 y 1.500 Hz. Su máxima efectividad se obtiene durante el monitoreo de eventos de baja y media frecuencia como desalineación, desbalanceo, eje doblado, solturas mecánicas, resonancia, problemas estructurales, etc., en unidades *cero a pico* (0-pK) o RMS.

Sensores de Aceleración

Los acelerómetros son los instrumentos de medición más ampliamente difundidos. La medición directa que realizan es aceleración, de ahí su nombre. Poseen un rango de respuesta lineal en frecuencia bastante amplio (5kHz a 30 kHz); sin embargo, son más efectivos por encima de los 10 kHz. Los eventos de alta frecuencia emiten bajos niveles de energía; aún así, estos captadores tienen una excelente capacidad para suministrar señales de salida muy adecuadas.

Sus partes componentes se esquematizan básicamente en la figura 4.2.11.

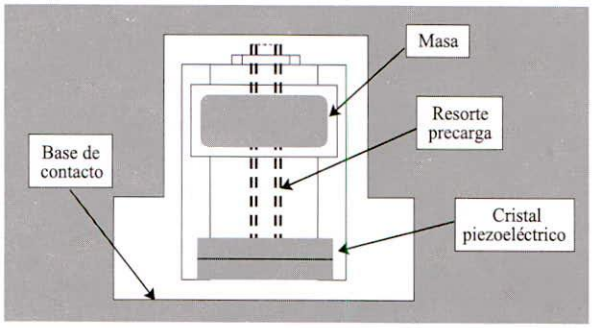


Figura 4.2.11
Esquema básico de un acelerómetro.

Un elemento piezoeléctrico es el encargado de emitir un voltaje según las variaciones en las fuerzas internas producidas por las vibraciones de la máquina. Un conjunto masa – resorte y un circuito electrónico completan los elementos de equilibrio dinámico y amplificación. La señal de salida muestra proporcionalmente el estado de la máquina desde el punto de vista vibratorio.

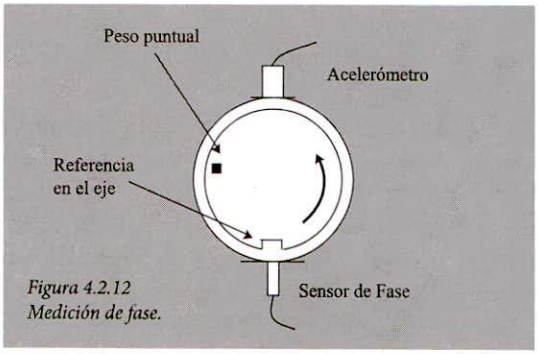


Figura 4.2.12
Medición de fase.

Medidores de Fase

Existen sensores de fase, ópticos y de corrientes parásitas (eddy current). La medición de fase hace su aporte más importante ayudando a discernir entre posibles causas de falla.

Además del sensor de fase es necesaria una referencia angular en el eje y un acelerómetro (figura 4.2.12.) Cuando la referencia en el eje pasa por delante del sensor de fase, éste emite un pulso eléctrico.

Un detalle importante para obtener buenas mediciones, es el montaje de los sensores. La calidad de la información, así como la repetibilidad en las lecturas, depende exclusivamente de estos factores. Las lecturas deben tomarse siempre en el mismo lugar; una pequeña variación en el punto de montaje puede cambiar drásticamente la información recolectada. Es común el uso de captadores magnéticos porque eliminan los errores humanos por dispersión en las condiciones de contacto. Se aconseja el uso de marcas indelebles para asegurar que todas las mediciones se realicen siempre en el mismo punto de la máquina. Si el apoyo del sensor es manual, el ángulo formado con la superficie debe ser recto. Tratar de ejercer, en todas las lecturas, la misma presión sobre el sensor para garantizar calidad y densidad de información. Evitar la influencia de flujos de aire intensos (grandes ventiladores) porque los instrumentos son muy sensibles a tales efectos. De optar por el montaje de discos porta sensores que logran una superficie recta en todas las mediciones, se recomiendan los cementos adhesivos de alta rigidez formulados a base de resinas epoxy.

4.2.4 Geometría de las Mediciones

Para lograr un diagnóstico certero es requisito llevar adelante un número mínimo de lecturas. Cada punto del equipo suele tener más de una medición, y cada una debe respetar algunos criterios de ortogonalidad. La potencia de la señal recolectada será mayor en la medida que la fuente (componente que emite la señal) se encuentre próxima al sensor. Lo habitual es efectuar dos lecturas radiales a 90° (vertical V y horizontal H) y una axial horizontal (A) en cada punto, para máquinas con disposición horizontal, figura 4.2.13a.

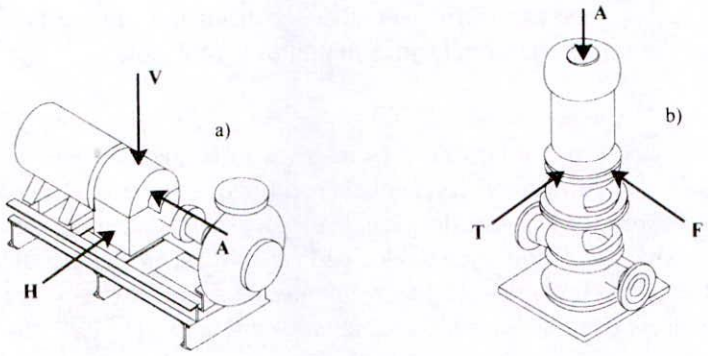


Figura 4.2.13 Lecturas Radial y Axial para máquinas con disposición horizontal o vertical.

Si bien los puntos de aplicación indicados para las tres mediciones mostradas no es el más conveniente, permite ilustrar el sentido y dirección adecuados para las lecturas.

Para máquinas cuya disposición es vertical, las lecturas serán como las indicadas en la figura 4.2.13 b. Dos mediciones radiales a 90° (frontal F y transversal T) y una axial vertical (A). La medición F (frontal) generalmente se efectúa de manera "frontal" a alguna referencia como, por ejemplo, la descarga en una bomba.

En algunas empresas la persona que efectúa la ruta predictiva (personal de planta) no posee un grado de capacitación suficiente que le permita diagnosticar problemas en campo. En estos casos se opta por la alternativa de relevar todas las lecturas indicadas precedentemente (3 por punto) y luego el ingeniero de mantenimiento baja la información a un programa de análisis y realiza el diagnóstico correspondiente para cada punto.

Por el contrario, si la persona encargada de *"rutear"* el predictivo es, además, un analista especializado con capacidad para diagnosticar *"in situ"*, sólo hace una medición radial (y a lo sumo una axial para todo el tren cinemático) y si detecta anormalidad (en amplitud y espectro), toma más lecturas radiales y axiales. Igualmente, y finalizada la recolección, baja los datos a un ordenador y diagnostica con más precisión.

La segunda alternativa es propia de aquellos casos en que el servicio de recolección y diagnóstico está en manos de una empresa contratada, cuyo especialista suele contar con más experiencia que el personal de planta. De todas maneras el departamento de mantenimiento debe, a lo sumo, delegar en un tercero la ejecución del trabajo (recolección + diagnóstico) pero nunca la responsabilidad.

Esto obliga a contar, como se mencionó en su oportunidad, con personal propio entrenado para validar el diagnóstico propuesto por la empresa que presta dicho servicio.

Existen dos tipos de rutas de monitoreo. Las Rutas de Mantenimiento Condicional[1] y las Rutas de Equipo. Las primeras ya fueron discutidas en el Capítulo 3; sobre las últimas, haremos algunos comentarios.

Una **Ruta de Equipo** representa la cadena cinemática del sistema. Se procura numerarla siempre en el sentido que se transmite la potencia; es decir, desde los componentes conductores hacia los conducidos. Resulta de mucha utilidad contar con un esquema que indique, por medio de números, la secuencia de cada punto. (Figura 4.2.14). En la medida que sea posible y necesario, efectuar mediciones Radiales (V y H) y Axiales (A). Un conjunto de Rutas de Equipo conforman una Ruta de Mantenimiento Condicional.

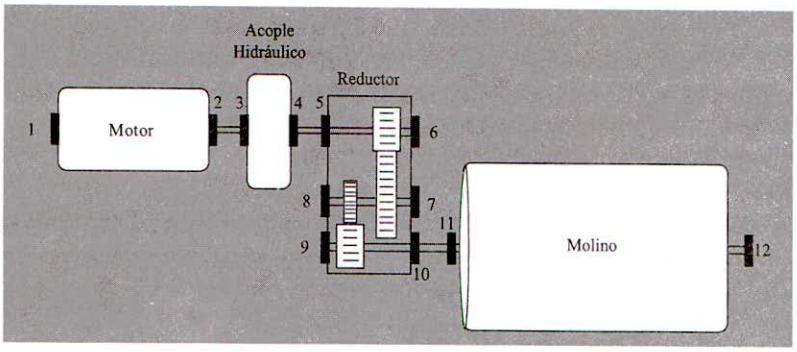


Figura 4.2.14 Ruta de Equipo. Numeración de puntos de medición en una cadena cinemática.

No es habitual tomar la fase como parámetro general de medición; únicamente cuando es necesario discernir entre más de una causa, se realiza su lectura en puntos apropiados.

4.2.5 Diagnóstico

Sabemos que, a menor vibración menor los esfuerzos internos en la máquina rotante. Por lo tanto, el objetivo indirecto del análisis de vibraciones es tener bajo control los esfuerzos internos del equipo. Por consiguiente, debemos ser capaces de diagnosticar, con la mayor certeza, las causas que provocan la variación de los esfuerzos. En máquinas con carga o velocidad variable, las mediciones deben hacerse bajo las condiciones más extremas de funcionamiento. Lo interesante del análisis espectral es determinar, con ayuda de la frecuencia, el origen de las fallas incipientes o sintomáticas.

√ **Amplitud:** A mayor amplitud, mayor severidad del problema respecto a su referencia.
√ **Frecuencia:** Necesaria para determinar el origen del problema.

Es sabido que las máquinas en buen estado usualmente vibran solamente a la frecuencia de rotación. A continuación se describen los problemas más comunes en máquinas rotantes. La tabla 4.2.4 resume las características y su relación con los valores relativos de amplitud, frecuencia y fase.

Desbalanceo

El desbalanceo es uno de los problemas más habituales en máquinas rotantes. Sucede cuando el eje central de masa no coincide con la línea central geométrica del cuerpo. A los fines del análisis, se identifican tres tipos: *estático, cupla y dinámico* (combinación de los dos primeros).

Desbalanceo estático: Se manifiesta en rotores no esbeltos (largo < 50% del diámetro). Puede producirse por desgaste radial y puede detectarse en reposo. Dinámicamente se asume que un único peso está ubicado fuera del eje central geométrico.

Desbalanceo en cupla: Principalmente en rotores esbeltos (longitud no despreciable frente al diámetro). Dos pesos iguales estarían dispuestos a 180° y en distinto plano transversal al eje de rotación. Cuando el rotor gira, las fuerzas tienden a mover el rotor en dirección opuesta al de sus respectivos extremos. Las fases a ambos lados del rotor se diferencian en 180°.

---

1 Ver "Rutas de Mantenimiento Condicional" sección 3.1.6, Capítulo 3.

Desbalanceo Dinámico: Es la combinación de los anteriores y se presenta generalmente en equipos complejos. Para los rotores en voladizo influye el doblamiento del eje.

En cualquier caso se trata de un fenómeno de alta energía y baja frecuencia (1X de las rpm). Aparecen amplitudes elevadas en las lecturas radiales. La relación con la fase se observa en la figura 4.2.15.

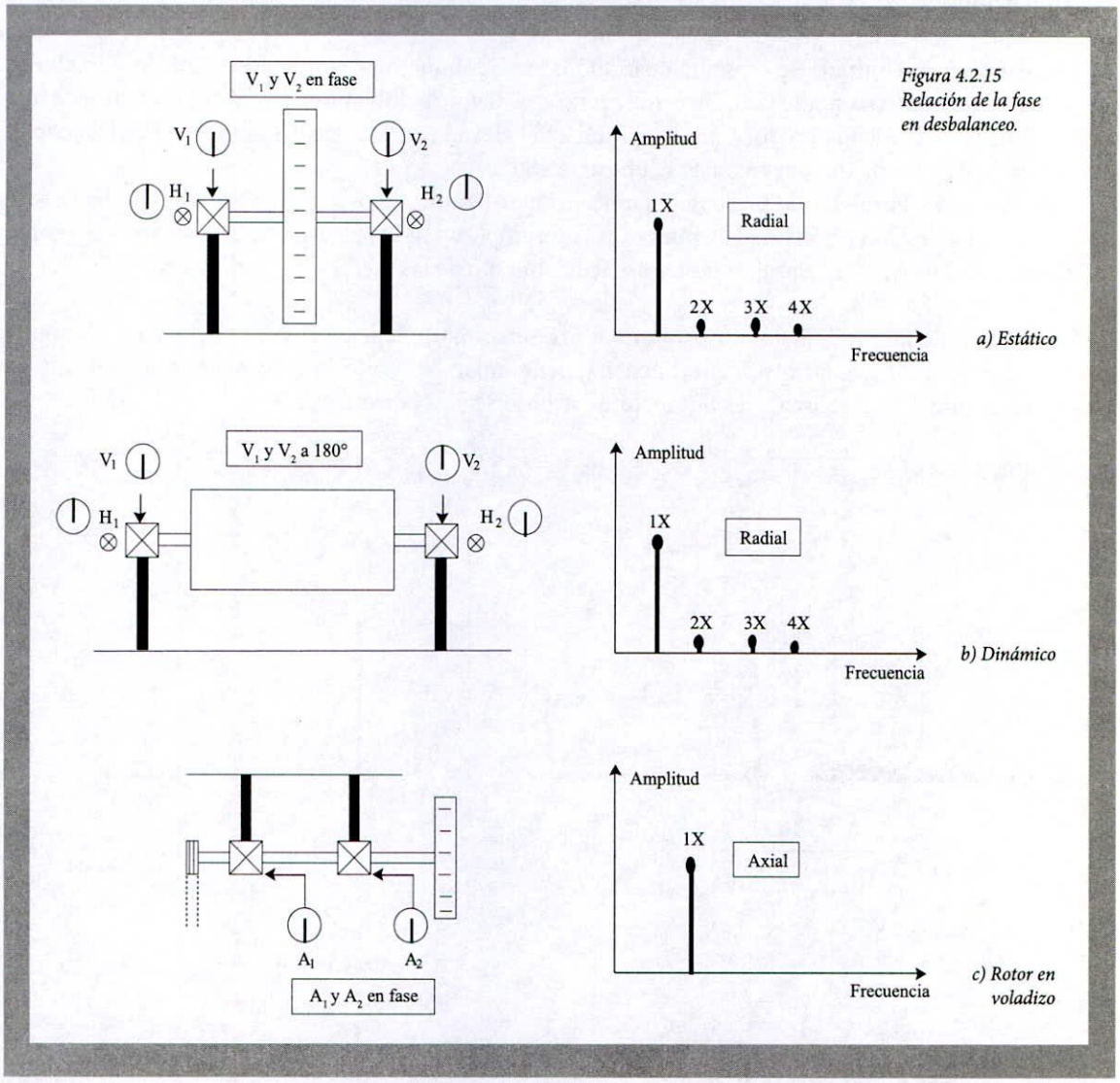


Figura 4.2.15
Relación de la fase en desbalanceo.

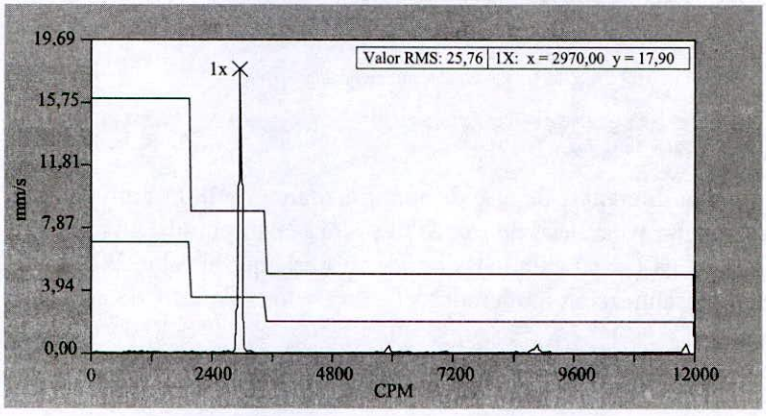


Figura 4.2.16
Espectro típico de velocidad para un caso de desbalanceo.

Para disposición horizontal de máquina, normalmente la amplitud medida en sentido vertical es menor que la lectura horizontal, debido a la diferencia de rigidez estructural[1]. A su vez, habrá una diferencia de 90° en la fase entre medición Horizontal y Vertical en cada extremo dado que los sensotransductores se colocan justamente a 90°.

Desalineación

Desalineación Angular: Se presenta cuando los ejes (conductor – conducido), unidos por acople, no son paralelos. Internamente se induce una fuerza que tiende a doblar los ejes. Si sólo ocurre este tipo de desalineación, la misma provoca una amplitud axial elevada en 1X y 2X. A ambos lados del acoplamiento, la fase de las mediciones axiales se ubican a 180°.

Desalineación Paralela: Se presenta cuando los ejes (conductor – conducido) son paralelos pero desplazados. La desalineación paralela pura causa una amplitud radial elevada en 2X *(ocurre una vez por cada dos vueltas de eje)*. El defasaje a través del acoplamiento de las mediciones radiales es 180°.

La relación de fase en los dos casos, junto a los espectros típicos teóricos, se ilustran en la figura 4.2.17. Cabe destacar que las mediciones deben tener el mismo *sentido* en ambos lados de la máquina. Observe la figura 4.2.17 a, donde las dos lecturas se hacen hacia la izquierda.

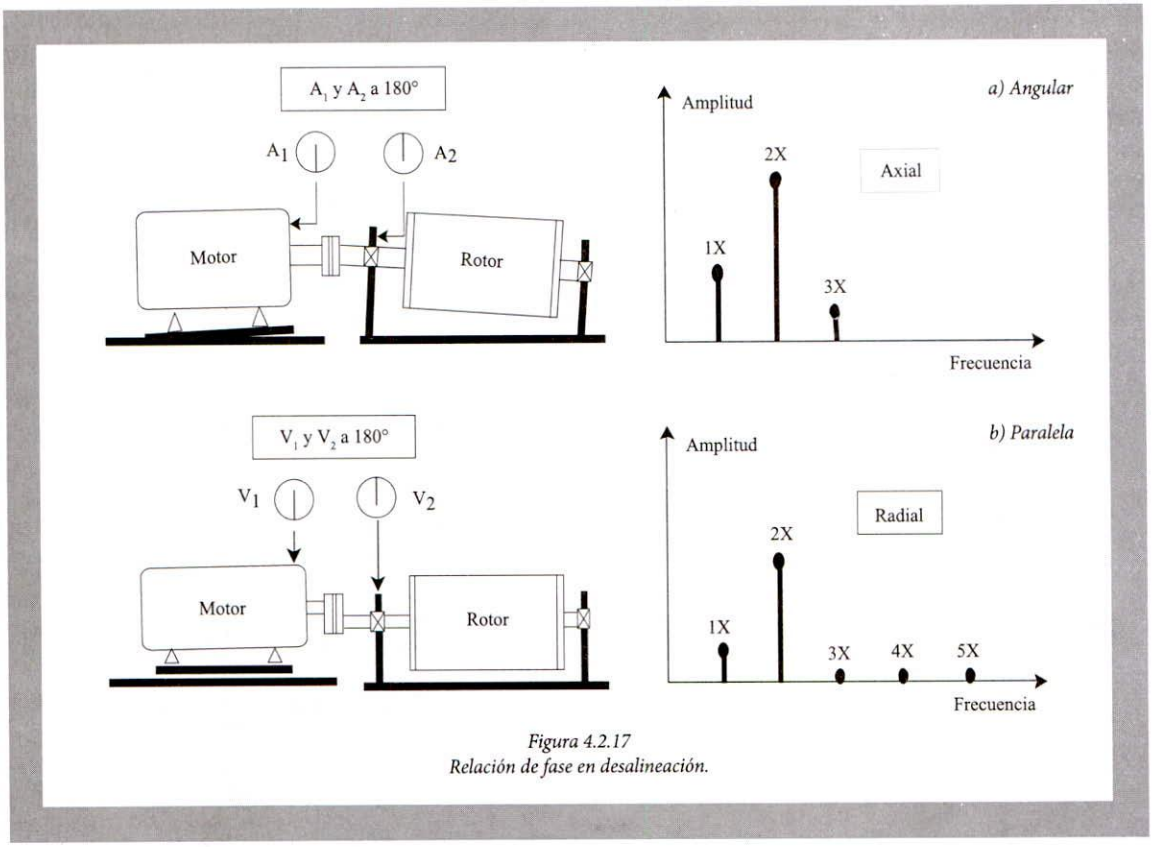


Figura 4.2.17
Relación de fase en desalineación.

Cuando se mide una diferencia de fase de aproximadamente 180° tanto en Axial como en Radial, la desalineación es angular y paralela. En lo que respecta a la amplitud, la figura 4.2.18 muestra dos espectros de velocidad en 1X (Axial y Radial) donde se aprecia que el valor de la lectura Axial (fondo) es mayor que el Radial (desalineación moderada). Obsérvese los valores RMS en ambas lecturas.

---

1 Ver Anexo III, Norma ISO 10816.

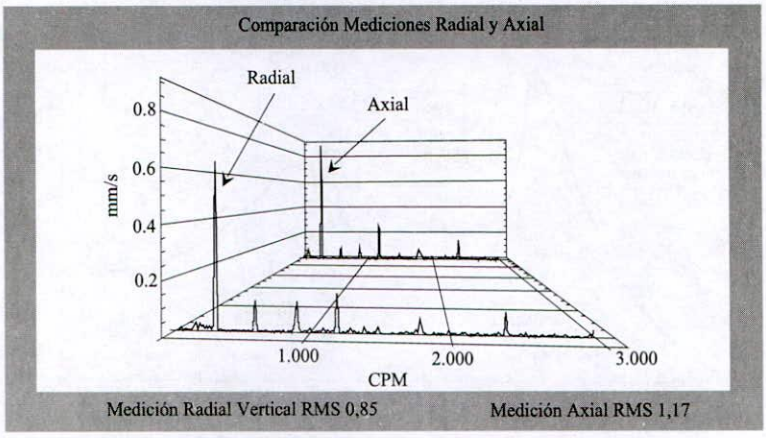


Figura 4.2.18
Espectro de velocidad Axial y Radial.

Si existe desalineación entre un rodamiento y su eje de montaje, la amplitud medida axialmente también es excesiva. Así mismo, cuando la desalineación se presenta entre poleas conductora y conducida en una transmisión, aparece también alta componente axial en 1X.

Eje doblado

Se trata de una situación similar a la desalineación angular. Se presenta fundamentalmente en rotores o ejes largos (esbeltos). Para distinguir entre desalineación y eje doblado, debe medirse la fase. Es preciso, no obstante, desacoplar los ejes para notar su influencia. Un eje doblado pero acoplado se manifiesta por desalineación.

Las mediciones axiales en los extremos del eje se encuentran desfasadas 180°; por su parte, las radiales están en fase. Ver figura 4.2.19.

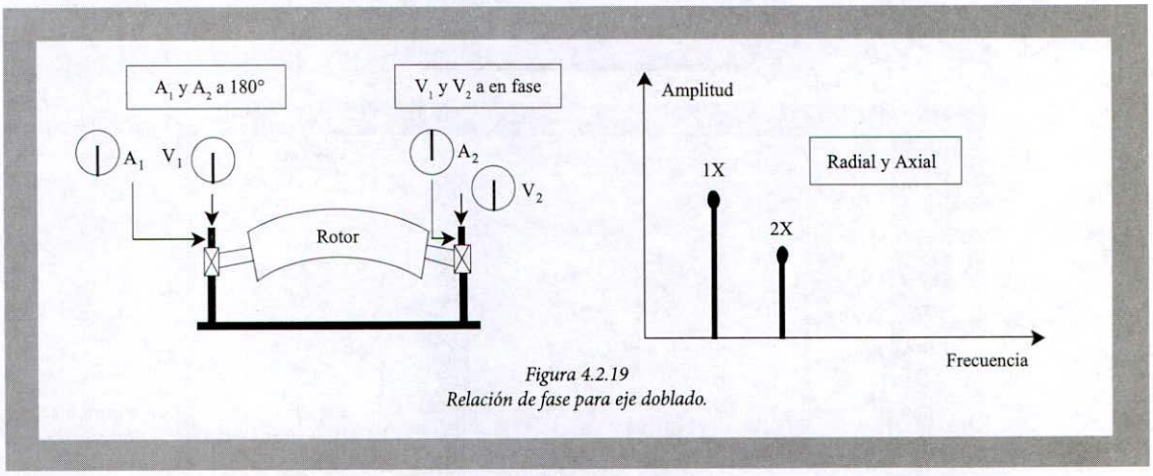


Figura 4.2.19
Relación de fase para eje doblado.

Resonancia

Las fuerzas exteriores que perturban el sistema se presentan a cierta frecuencia. Si alguna de las frecuencias de excitación coincide con las frecuencias naturales del sistema, aumenta considerablemente la amplitud de los eventos. Este fenómeno se denomina resonancia. Los efectos de resonancia pueden causar graves daños en los equipos y han sido motivo de severos accidentes en la industria y los medios de transporte.

La fase de la primera zona de funcionamiento (Ver figura 4.2.20) está adelantada 90° respecto a la señal leída en la propia zona de resonancia. Por su parte, cuando se pasa la zona de resonancia vuelve a producirse un retraso de 90°. Esto provoca que la señal medida antes y después de la zona *severa* tenga una diferencia de 180°. La velocidad crítica de una máquina rotante es aquella cuya frecuencia de giro (rpm) se hace coincidente con la frecuencia natural.

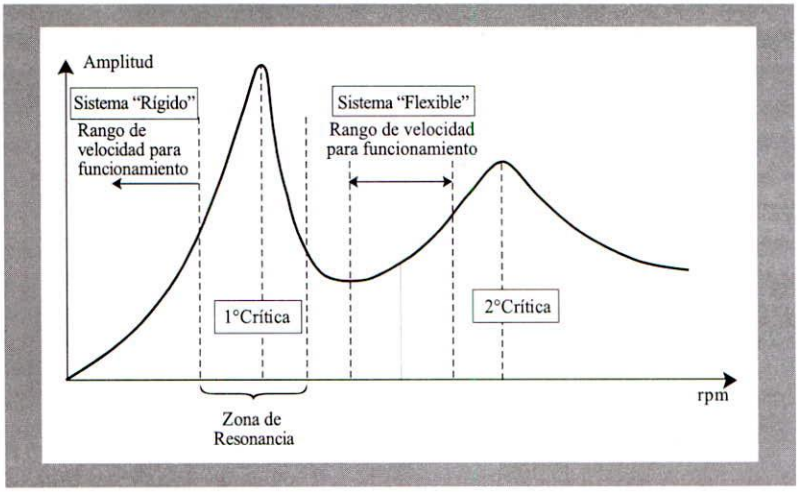


Figura 4.2.20 Amplitud Vibratoria–Velocidad de Rotación (rpm) para sistemas "máquina–soporte" del tipo rígido y flexible[1].

Solturas Mecánicas

Las flojedades mecánicas suceden a consecuencia de aflojamientos en distintas partes de una máquina (soportes, anclajes, caja de cojinetes, etc.). Producen gran cantidad de armónicas, inclusive subarmónicas en 1/2 X de las rpm, en algunos casos. A la frecuencia 2X, la amplitud radial vertical de velocidad es alta (incluso llega a ser mayor que dos veces la 1X). Las amplitudes de las armónicas son de consideración, pero van decreciendo conforme aumenta la frecuencia. Las lecturas de RMS en velocidad y en la dirección axial son bajas. Generalmente una soltura mecánica es acompañada de desbalanceo.

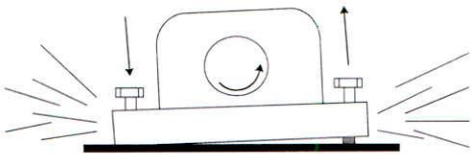


Figura 4.2.21 Esquema de soltura mecánica.

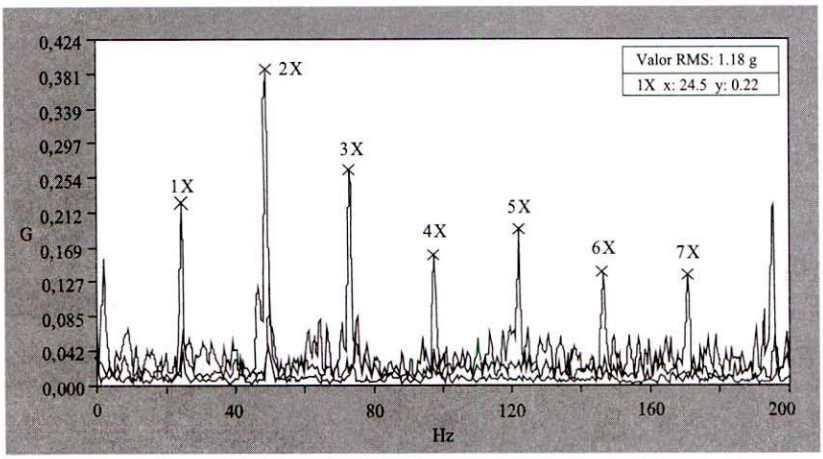


Figura 4.2.22 Espectro de aceleración con síntomas de flojedad mecánica.

El espectro anterior de aceleración ilustra un caso de soltura mecánica. La 2X es elevada y aparece, además, una secuencia de armónicas decrecientes.

Oil Whirl

Este fenómeno físico, también conocido como "giro o batido de aceite", sucede en cojinetes de fricción cuyos ejes operan a altas velocidades. La excentricidad del eje dentro del cojinete puede variar por excesiva carga, golpes, variación en la temperatura del aceite, etc. y se produce una fuerza incremental que aumenta el nivel vibratorio del conjunto.

---

1 Ver Anexo III, norma ISO 10816.

Manifiesta su existencia entre 1/3X y 1/2X de las rpm (ligeramente < a 1/2X). Generalmente la componente medida en dirección vertical es levemente superior a la horizontal. También puede ocurrir una patología de oil whirl con una frecuencia equivalente a la velocidad de la primera crítica del eje, aún cuando el mismo funcione por encima de dicha velocidad (rotor flexible). Por ejemplo, si la primera crítica de un eje se presentara a 2.400 rpm (aunque opere normalmente a 3.000 rpm), aparecería una amplitud fuera de lo normal en 2.400 cpm (40 Hz) en las mediciones radiales.

Excentricidad

Ocurre una excentricidad cuando el centro geométrico de una polea o engranaje no coincide con el centro de rotación del sistema. Se manifiesta por elevado valor radial en 1X (de las rpm de la polea excéntrica) y en la dirección imaginaria que une los centros de poleas conductora y conducida. En ocasiones se confunde este efecto con desbalanceo y, si bien es posible eliminarlo con un rebalanceo del sistema, puede obedecer a causas diferentes. Situaciones de excentricidad pueden ocurrir también en transmisiones a engranajes.

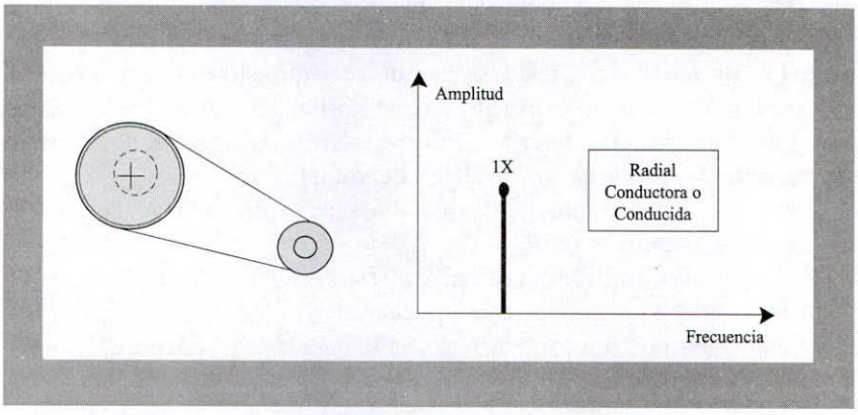


Figura 4.2.23 Excentricidad en poleas.

Problemas en Correas ó Bandas

Las poleas flojas o con excesivo desgaste se manifiestan siempre a frecuencias menores que las de rotación. Además, generan varias armónicas (hasta 4X) de la *frecuencia de paso de las correas* (f_{Pc}).

$$f_{Pc} = \frac{rpm_D \times \pi \times D}{L} = \frac{rpm_d \times \pi \times d}{L} \qquad (4.2.1)$$

En la ecuación 4.2.1, rpm_D y rpm_d son las velocidades de las poleas conductora y conducida respectivamente y L, la longitud de la correa.

Problemas de Flujo

Es posible identificar problemas de este tipo en la denominada *frecuencia de paso de flujo* (f_{Pf}). La misma se obtiene como el producto del número de aspas, alabes (paletas) de impulsores, ventiladores, etc., y la frecuencia de rotación del eje conductor.

$$f_{Pf} = N° \text{ palas} \times rpm \qquad (4.2.2)$$

Problemas en Motores Eléctricos de Inducción

El motor eléctrico de inducción es uno de los equipos más utilizados en la industria. Sus modos de falla están sujetos a patrones característicos muy complejos. Sin embargo, se están logrando avances de importancia para identificar patologías sintomáticas. Se destinan importantes sumas de dinero para el mantenimiento de estas máquinas, por lo que cualquier aporte logrado por las técnicas de diagnóstico de fallas, es siempre de utilidad.

En esta parte se abordan resumidamente los típicos problemas en motores, detectables por medio del análisis de vibraciones. Existen, además, otras herramientas de análisis que se describen en la sección 4.5 bajo el nombre, *"Otras Técnicas Condicionales"*.

Los modos de falla en los motores eléctricos de inducción se agrupan bajo dos criterios. El primero incluye los *fallos mecánicos*; el segundo, los *electro-magnéticos*. Desde el punto de vista mecánico, un motor es una máquina rotante con las fallas sintomáticas características de tales equipos (desalineación, desbalanceo, problemas en rodamientos, fallas de lubricación, flojedades, etc.). Por su parte, los problemas electro-magnéticos se relacionan con el campo magnético reinante en el motor durante su operación bajo carga.

√ Factores Mecánicos

A) Los **rodamientos** constituyen una fuente de vibración. Cualquier daño incipiente sería posible identificarlo con esta técnica[1]. Para detectar síntomas en rodamientos siempre es conveniente cortar el flujo de alimentación eléctrica y hacer la lectura.

B) Para los problemas de **desbalanceo y resonancia** se analizan los espectros alrededor de la frecuencia 1X de las rpm, cortando la alimentación cuando el motor está con carga nominal. Las vibraciones en tal condición permiten observar fallas sintomáticas mecánicas.

C) Las barras del rotor dañadas o fisuradas generan corriente asimétrica y por ende una excentricidad en el rotor del tipo rotacional. La excentricidad rotacional desplaza al rotor del centro magnético del estator y, además, hace que describa una órbita dentro de él (se produce un campo magnético rotativo y pulsante de sentido contrario al giro del rotor).

Se denomina frecuencia de deslizamiento (f_d) a la diferencia entre la velocidad de giro del campo magnético del estator y las rpm del rotor.

La figura 4.2.24 muestra las bandas laterales ubicadas a f_d x *np* de 1X, donde *np* es el número de polos. Al producto anterior se lo conoce como frecuencia de paso de polos ($f_{PP} = f_d$ x np). El valor máximo del par entregado por el rotor ocurre a una frecuencia equivalente a f_{PP}. A su vez, f_L es la frecuencia de línea o alimentación.

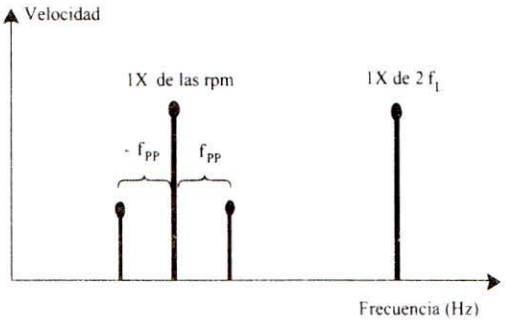


Figura 4.2.24 Espectro característico de variación rotacional del entrehierro.

Estos síntomas son identificables con analizadores de espectro de alta resolución (por lo general mayor a 3.500 líneas). La herramienta debe contar con la prestación adicional de efectuar *zoom real*, e identificar las bandas laterales de la frecuencia de deslizamiento con exactitud. Si las características del analizador de espectro no son las indicadas, podrán confundirse estos síntomas con problemas de desbalanceo. El monitoreo se realiza con el motor trabajando con carga nominal.

√ Factores Electro-magnéticos

Las fuerzas radiales internas e inducidas en el motor son proporcionales a la carga aplicada y al huelgo del entrehierro (rotor – estator), y su intensidad variará dependiendo de si trabaja en vacío o con carga. Algunas fallas no severas sólo pueden detectarse con el motor actuando con carga nominal.

El primer paso es monitorear la amplitud de las vibraciones a una frecuencia igual al doble de la de línea (f_L = 50 Hz), 1X de $2f_L$. También en 2X de $2f_L$.

---

1 Ver "Problemas en Rodamientos" en esta Sección.

A) Corto en el bobinado del estator. Esto provoca corriente asimétrica y cambios del entrehierro de tipo *estacionario* (el eje del rotor gira en una posición fija pero desplazado respecto al centro magnético del estator). Un espectro típico e ideal de variación estacionaria se muestra en la figura siguiente.

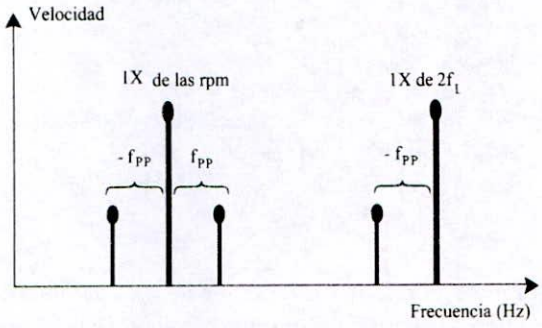


Figura 4.2.25 Espectro característico de variaciones estacionarias de entrehierro.

B) Pulsos torcionales. Introducen vibraciones de baja amplitud que pueden excitar frecuencias de resonancia cercanas a 2X de f_L[1].
Nota: Los variadores de velocidad inducen armónicas a la frecuencia de línea, que pueden provocar sobrecalentamiento en estator y rotor.

Una alternativa para el control integral del motor, es realizar pruebas en vacío (sin carga). Sin embargo, no todos los problemas eléctricos se observan en esa condición. Algunas fallas sintomáticas son proporcionales a la corriente de alimentación que, a su vez, depende de la carga de trabajo aplicada.

Si bien los espectros de vibraciones constituyen una herramienta de gran utilidad para el descubrimiento de fallas en motores eléctricos, no siempre el resultado debe tomarse como mandatorio para decidir la intervención en el activo. Un diagnóstico de fondo tendrá que considerar, además, otras contrapruebas que validen los resultados (control de aislación, fugas, calidad de la energía de alimentación, conexiones de potencia, etc.). Además, no en todos los casos se cuenta con equipos analizadores de alta resolución ni con personal técnico capacitado en el diagnóstico de estos síntomas. En los puntos tratados anteriormente puede apreciarse que los síntomas de fallas en rotor y estator tienen un carácter muy sutil y que cualquier interpretación errónea conduce a diagnósticos desacertados[2].

Problemas en transmisión a engranajes
Los mecanismos de transmisión a engranajes producen vibración naturalmente en el rango de las medias frecuencias. Es imprescindible conocer, antes de emitir un diagnóstico, cuales son las características vibratorias propias del sistema. Además de contar con la información técnica de rigor (tipo de engrane, potencia, rpm, rodamientos, lubricante, etc.), es preciso calcular los parámetros vibratorios característicos de la máquina.

Se denomina *frecuencia de engrane* (también llamada de encuentro) a la frecuencia con que se produce el contacto entre dientes. Es un valor fundamental para el análisis, y se obtiene de multiplicar la velocidad de giro (rpm) del engranaje por su número de dientes. La figura 4.2.26 ilustra un esquema básico para comprender el concepto de frecuencia de engrane.

Si la línea de engrane (contacto deslizante) entre dientes coincide con el diámetro primitivo, y el sistema se encuentra en condición básica (sin modos de falla en progreso), la vibración ocurre a la frecuencia de engrane f_e (y en ocasiones muy levemente en sus armónicas). Además, la amplitud de la señal vibratoria será proporcional a la potencia transmitida o par.

---

1 Evelio Palomino Marín. "La Medición y el Análisis de Vibraciones en el diagnóstico de Máquinas Rotatorias" página 95, Cuba 1997.
2 Ver punto 4.5.12 "Análisis de Motores Eléctricos".

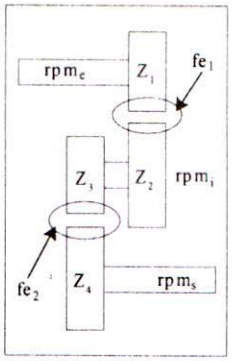


Figura 4.2.26 Frecuencia de engrane.

La figura anterior muestra el esquema de un reductor de ejes paralelos. Z_1 y Z_2 es la cantidad de dientes del conductor y conducido del 1° tren de engranes. Por su parte, Z_3 y Z_4 corresponden al 2° tren o tren de salida. La velocidad de los ejes de entrada, intermedio y salida, se designan con rpm_e, rpm_i y rpm_s respectivamente. Las dos frecuencias de engrane (1° y 2° tren), serán:

$$fe_1 = rpm_e \times Z_1 = rpm_i \times Z_2$$
$$fe_2 = rpm_i \times Z_3 = rpm_s \times Z_4 \qquad (4.2.3)$$

Si el ejemplo teórico anterior no manifiesta ninguna falla sintomática, el espectro será como el ilustrado en la figura 4.2.27. Las mediciones de aceleración podrán ser radiales o axiales (o ambas) dependiendo de las condiciones. Nótese que las armónicas de las frecuencias de engrane presentan baja amplitud.

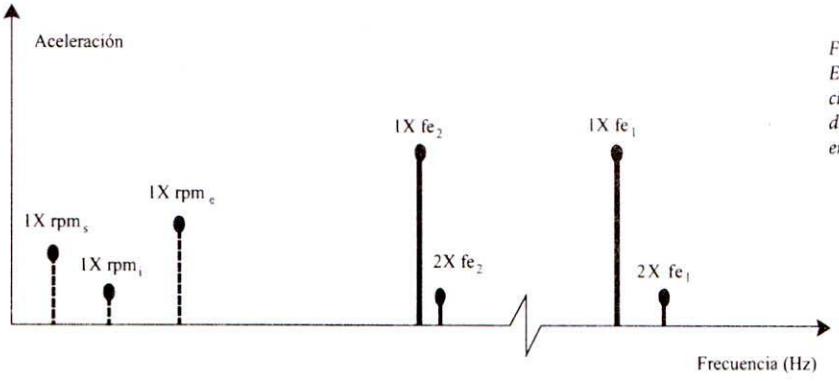


Figura 4.2.27 Espectro de aceleración característico de la frecuencia de engrane.

El anterior es un esquema ilustrativo teórico y las magnitudes de amplitud y frecuencia no están en escala. En baja frecuencia se aprecia la componente 1X correspondiente a cada eje y la amplitud vibratoria debería ser baja de no existir fallas en esos componentes. Considerando como conductor al engranaje designado con Z_1, su frecuencia de engrane (fe_1) será mayor que la frecuencia de engrane correspondiente al 2° tren (fe_2). Como generalmente la diferencia de frecuencias es grande, en el esquema se marca una línea quebrada en el eje de las frecuencias (Hz). Las frecuencias de engranes en ejes conductores se ubican en el rango de las medias y altas frecuencias.

De producirse desperfectos mecánicos en los dientes de engrane, es de esperar armónicas de la frecuencia de engrane, de mayor amplitud en el tren dañado. Incluso en ocasiones suele aumentar el valor de las armónicas en 3X (3X f_e del tren dañado).

Veamos el esquema teórico anterior pero suponiendo un daño sobre el 1° tren.

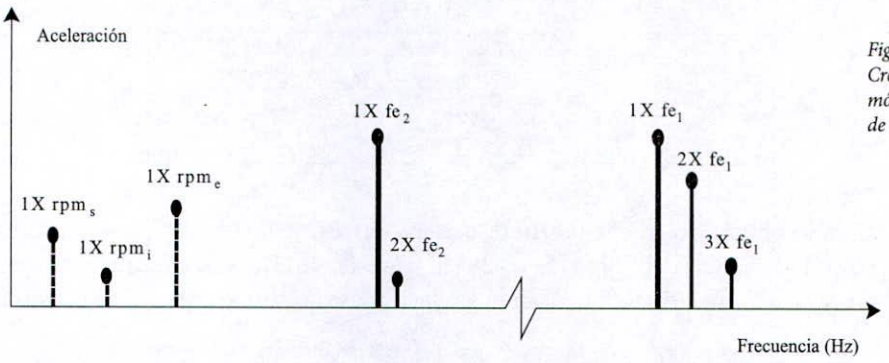


Figura 4.2.28 Crecimiento de armónicas alrededor de 1X fe$_1$.

Obsérvese el crecimiento de la segunda armónica alrededor de la frecuencia 1X fe$_1$ y el surgimiento incluso de la tercera armónica.

Ejemplo 4.2.2

Supóngase por caso que el sistema mostrado anteriormente en la figura 4.2.26 tiene una velocidad de entrada de 1.500 rpm. El número de dientes de cada engranaje es $Z_1 = 16$, $Z_2 = 168$, $Z_3 = 17$ y $Z_4 = 146$. Utilizando las ecuaciones 4.2.3, resultan los siguientes parámetros vibratorios.

#	N° dientes	rpm	1X (cpm)	1X (Hz)	1X fe (cpm)	1X fe (Hz)
Z_1	16	1500	1500	25	24000	400
Z_2	168	143	143	2,38	24000	400
Z_3	17	143	143	2,38	2429	40,5
Z_4	146	17	17	0,28	2429	40,5

Tabla 4.2.1 Parámetros vibratorios del ejemplo 4.2.2.

La frecuencia de engrane del 1° tren (fe$_1$) se ubica en los 400 Hz, mientras que la del 2° es levemente superior a los 40 Hz. Por su parte, la 1X de cada eje aparece en baja frecuencia (de 0,28 a 25 Hz). Esto hace pensar que una falla sintomática en el 1° tren debería acusar un aumento en amplitud de aceleración en la 2° y 3° armónica de fe$_1$ = 400 Hz (medias frecuencias). Por su parte, si la falla estuviese localizada en el 2° tren, las armónicas buscadas corresponderían a los 40,5 Hz.

Ejemplo 4.2.3

A continuación se muestra un espectro de aceleración medido durante una inspección de rutina. Como punto sobresaliente se observó una amplitud fuera de lo normal a los 425 Hz.

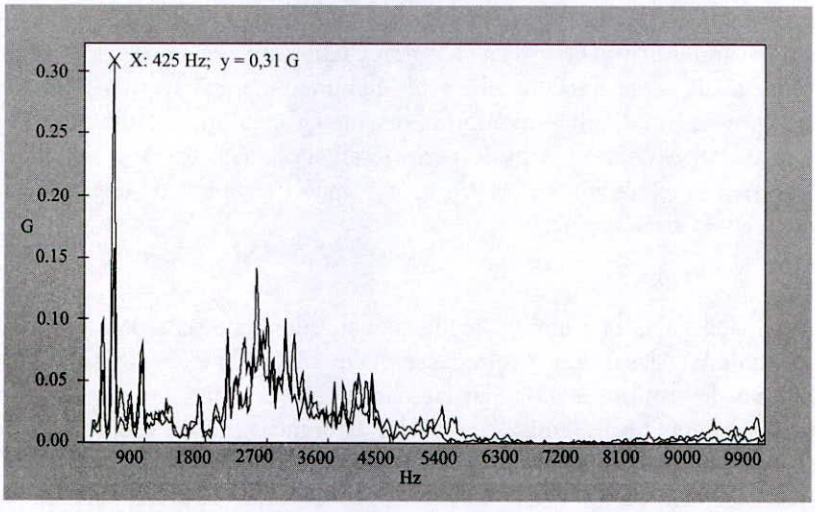


Figura 4.2.29 Espectro de aceleración (fondo de escala 9.900 Hz).

Aunque la magnitud de aceleración no es excesivamente elevada (0,31 G), se decidió realizar un estudio en el reductor reuniendo los parámetros vibratorios según la tabla 4.2.2.

#	N° dientes	rpm	1X (cpm)	1X (Hz)	1X fe (cpm)	1X fe (Hz)	2X fe (Hz)
Z_1	17	1500	1500	25	25500	425	850
Z_2	54	472	472	7,87	25500	425	850
Z_3	17	472	472	7,87	8028	133,8	267,6
Z_4	69	116	116	1,94	8028	133,8	267,6

Tabla 4.2.2 Parámetros vibratorios del ejemplo 4.2.3.

La tabla ratifica lo observado en el espectro de aceleración; existe una componente llamativa de aceleración a la frecuencia de engrane del 1° tren (fe_1 = 425 Hz.). Ajustando el fondo de escala hasta sólo los 990 Hz (para ver las bajas y medias frecuencias), y pasando a velocidad, se obtiene el espectro de la figura 4.2.30

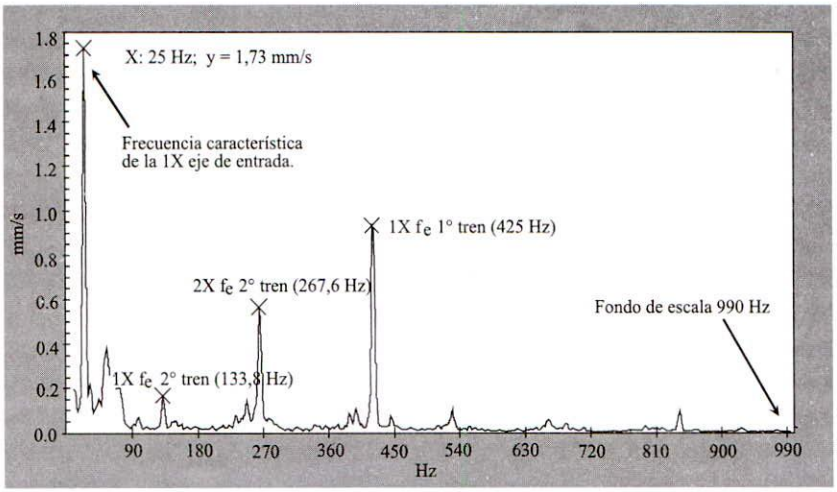


Figura 4.2.30 Espectro de velocidad del ejemplo 4.2.3.

Resulta interesante analizar conjuntamente la información de la tabla 4.2.2 y del espectro de velocidad.

A la izquierda del espectro se observa claramente la 1X de las rpm del eje de entrada con un valor en velocidad de 1,73 mm/s más allá de lo normal (1.500 cpm = 25 Hz). El especialista diagnosticó probable giro excéntrico del rotor del motor eléctrico (hecho que se analizó por separado efectuando mediciones de fase con el motor desacoplado).

En lo que respecta al reductor, se identificó un claro síntoma de falla en el 2° tren. Obsérvese la armónica 2X fe_2 a los 267,6 Hz. El valor de amplitud es mayor que el de la 1X fe_2, (0,57 > 0,16 mm/s). Sin embargo, no aparecen armónicas del 1° tren (850 Hz). El diagnóstico resultó en un síntoma de falla en el 2° tren de engrane.

Para conocimiento del lector, este reductor se averió una semana antes que la fecha programada para su sustitución, observándose daño severo en el 2° tren y daños incipientes en el 1° juego de engranajes.

En lo que respecta a la carga aplicada cabe decir que un aumento excesivo en la potencia transmitida, se manifiesta por medio de un aumento importante en amplitud a la frecuencia de engrane, no así de sus armónicas. Por el contrario, un desperfecto en las superficies de contacto deslizante, acusa crecimiento progresivo de vibración en las armónicas de la frecuencia de engrane. Inclusive pueden aparecer armónicas en 3X del engrane.

Cepstrum

El cepstrum es una alternativa que ofrecen algunos analizadores de señal vibratoria. Las cajas de engranajes (fundamentalmente las de 2 o más trenes) emiten señales características en muchas frecuencias. Esto provoca familias de armónicas o bandas laterales que convierten en muy dificultosos los espectros de velocidad o aceleración. Además, cuando las armónicas provenientes de distintos elementos del sistema (con desgaste) se ubican en frecuencias muy cercanas, los analizadores deben ser de alta resolución (mayor a 3.200 líneas). De lo contrario, es probable que alguna banda lateral se confunda o superponga con otra de mayor amplitud, y sencillamente no se vea. Se suma a esta dificultad el hecho que la vibración de engrane puede sufrir modulación en su amplitud y frecuencia a consecuencia, por ejemplo, de la excentricidad entre ejes y engranajes.

La metodología calcula el espectro logarítmico de la transformada rápida de Fourier, separando las armónicas y permitiendo individualizarlas para observar su tendencia en el dominio de las frecuencias decrecientes (1/Hz). La magnitud de la amplitud se expresa en dB.

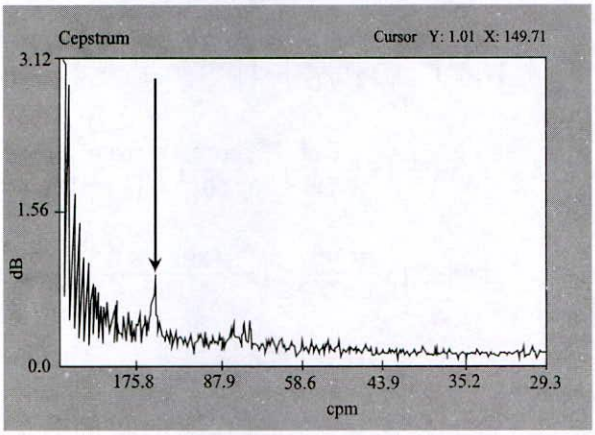


Figura 4.2.31 Cepstrum característico de un tren de engranajes.

Problemas en Rodamientos

La ubicación (equipo y contexto operativo) de algunos rodamientos hace que sus modos de falla puedan tener consecuencias severas para el proceso productivo. La aplicación del análisis de vibraciones en estos casos tiene su máximo beneficio siempre que se establezcan todas las propiedades vibratorias del sistema (incluyendo la de los rodamientos). Un rodamiento puede presentar falla sintomática por varias razones, como ser: lubricación insuficiente, fatiga de las superficies deslizantes, contaminación del lubricante, cargas elevadas (desbalanceo, desalineación, eje doblado, etc.), montaje inapropiado, obsolescencia, defectos de fabricación, etc.

La lubricación en rodamientos es del tipo elasto – hidrodinámica, y la presión en los puntos de contacto puede llegar a valores muy elevados. Si bien las superficies bajo carga se flexionan o deforman ligeramente aumentando el área de fricción, el lubricante se comporta como un fluido compresible y la película residual es apenas de algunos micrones. Esta situación suele provocar fatiga debajo de la zona de rodadura (debajo del material duro) y con el tiempo aparecer fragmentaciones superficiales de crecimiento gradual que acortan la vida del rodamiento[1]. La fragmentación aumenta con el paso cíclico de los elementos sobre la impronta.

Otra falla posible son las pequeñas hendiduras o defectos que se forman sobre las pistas, originadas por una lubricación inadecuada, partículas contaminantes o defectos de fabricación. Los síntomas de falla en rodamientos generan señales vibratorias de baja energía en el rango de las medias y altas frecuencias (varios impactos por vuelta de eje). Además, se generan armónicas en el rango de las frecuencias elevadas. Todos los rodamientos tienen frecuencias naturales específicas, propias de sus parámetros geométricos (diámetro de bolilla, diámetro medio, número de bolillas y ángulo de contacto). Los fabricantes calculan y suministran estas frecuencias de falla para el diagnóstico, denominado *Análisis Cinemático*. Luego, se estudia el espectro e identifican los picos en cada una de estas frecuencias. Un pico elevado en una frecuencia de falla (o armónicas), indica que el rodamiento tiene localizado un problema en esa parte. Sin perjuicio de lo cual pueden ocurrir defectos en más de una frecuencia específica simultáneamente. Durante las mediciones es conveniente que la dirección del sensor coincida con la dirección de mayor carga sobre el rodamiento.

Se identifican cuatro frecuencias naturales específicas.

√ Frecuencia de Falla Pista Interna f_{PI} *(Ball Pass Frequency of the Inner Race - BPFI)*
√ Frecuencia de Falla Pista Externa f_{PE} *(Ball Pass Frequency of the Outer Race - BPFO)*
√ Frecuencia de Falla en Elemento Rotante f_{ER} *(Ball Spin Frequency - BSF)*
√ Frecuencia de Falla en Jaula o Canasta f_J *(Fundamental Train Frequency - FTF)*

1 Norma ISO 281 (Evaluación de la vida nominal de rodamientos en función de la carga).

Las que se obtienen a través de las siguientes ecuaciones aproximadas:

$$f_{PI} = \left(\frac{N}{2}\right) x \left(\frac{rpm}{60}\right) x \left(1 + \frac{Db \times \cos \beta}{Dm}\right) \quad 4.2.4$$

$$f_{PE} = \left(\frac{N}{2}\right) x \left(\frac{rpm}{60}\right) x \left(1 - \frac{Db \times \cos \beta}{Dm}\right) \quad 4.2.5$$

$$f_{ER} = \left(\frac{1}{2}\right) x \left(\frac{Dm}{Db}\right) x \left(\frac{rpm}{60}\right) x \left[1 - \left(\frac{Db}{Dm}\right)^2 \cos^2 \beta\right] \quad 4.2.6$$

$$f_J = \left(\frac{1}{2}\right) x \left(\frac{rpm}{60}\right) x \left(1 - \frac{Db \times \cos \beta}{Dm}\right) \quad 4.2.7$$

Donde:

N: número de bolillas
Db: diámetro de bolilla
Dm: diámetro pitch (o diámetro medio)
β = ángulo de contacto

En la figura 4.2.32 se ilustra un espectro de aceleración con las cuatro frecuencias de falla de un rodamiento montado en un motor eléctrico. Nótese la ubicación de la componente 1X y 2X del motor en el dominio de las frecuencias (24,5 y 49 Hz). La amplitud en la frecuencia de la pista interna supera el valor de alarma con 3,40 g, mientras que en la frecuencia de la pista externa la aceleración llega a 1,40 g superando el valor previsto de alerta. Las fallas en jaula (f_J) son propias de las bajas frecuencias (< 1/2X) y ocurren por fatiga. Su progreso hacia la falla catastrófica es muy acelerado y suele resultar difícil su observación con intervalos de monitoreo mayor al mes.

Una tabla en el margen superior derecho resume las frecuencias de falla provistas por el fabricante, para 1470 rpm; también, los valores de amplitud (en aceleración) máximos para frecuencias próximas a las indicadas.

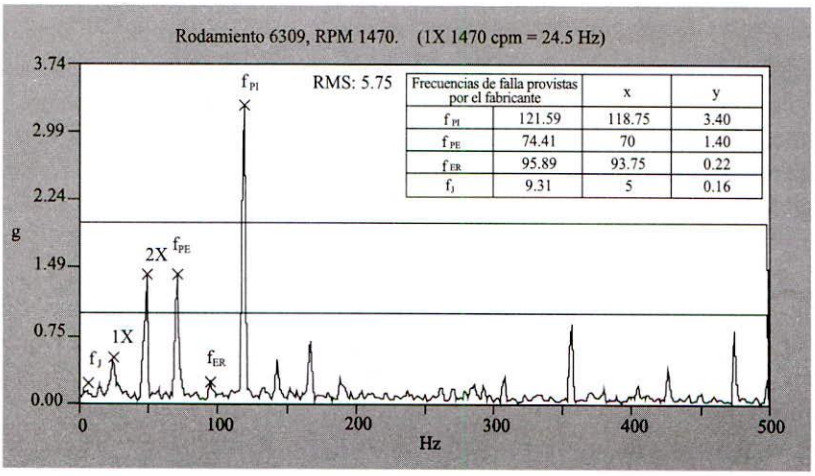


Figura 4.2.32 Frecuencias características en un rodamiento.

Esta categorización permite identificar con bastante certeza la causa del problema y tomar medidas para evitar su recurrencia. Además, resulta interesante diagnosticar la gravedad del síntoma y programar el reemplazo del rodamiento.

Sin embargo, la técnica del estudio de las frecuencias específicas de vibración es aplicable cuando las fallas son localizadas. Si la falla incipiente en algún elemento del rodamiento se transmite rápidamente al resto de los componentes, suelen obtenerse espectros confusos que dificultan la interpretación. Por este motivo se utiliza en forma alterna el **Análisis de Frecuencias Naturales**. Con un fondo de escala mayor para las altas frecuencias, este método resulta ser más práctico para diagnosticar síntomas de falla prematuros y distribuidos. En un espectro de aceleración se monitorea el valor RMS para un rango de frecuencias que, en equipos convencionales, se ubica por debajo de los 5 kHz. Las pequeñas irregularidades en las superficies de contacto excitan las diferentes partes del rodamiento en sus frecuencias naturales, ver figura 4.2.33.

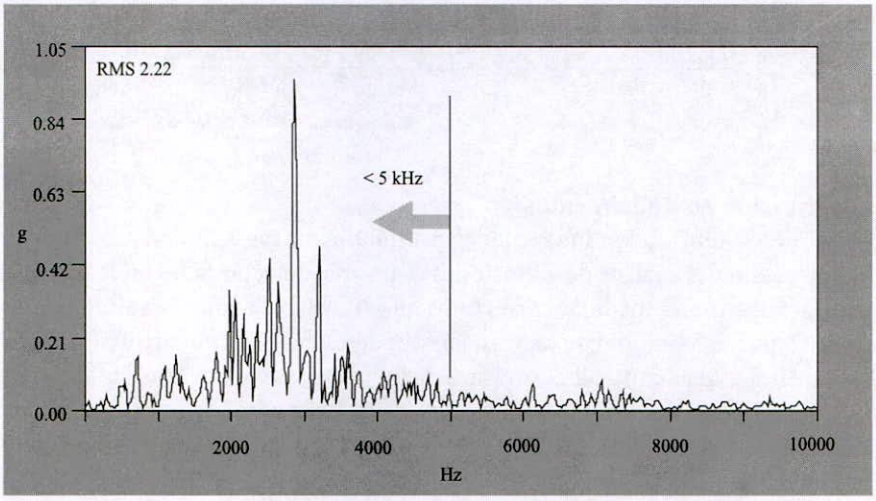


Figura 4.2.33 Espectro típico de falla incipiente en rodamiento.

Sin embargo, una falla severa (patología avanzada) se manifiesta mayoritariamente por debajo de los 2 kHz.

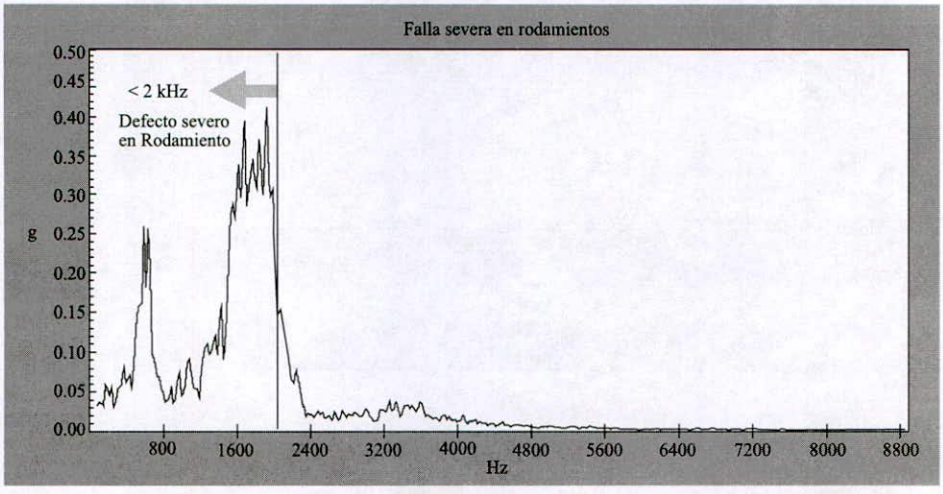


Figura 4.2.34 Espectro típico de falla severa en rodamiento.

Vale la pena mencionar un problema combinado en rodamientos cuando existe holgura de la pista interior respecto a su eje. *"En este tipo de holguras, el espectro de la vibración exhibirá una componente a la frecuencia de rotación y otra componente más baja a una frecuencia ligeramente menor que la frecuencia de rotación"* [1]. La pequeña diferencia en frecuencia corresponde al valor relativo entre eje y pista interior. Para detectar estos efectos se requieren analizadores de alta resolución.

---

1 Evelio Palomino Marín de su libro "La Medición y el Análisis de Vibraciones en el diagnóstico de Máquinas Rotatorias" página 86, Cuba 1997.

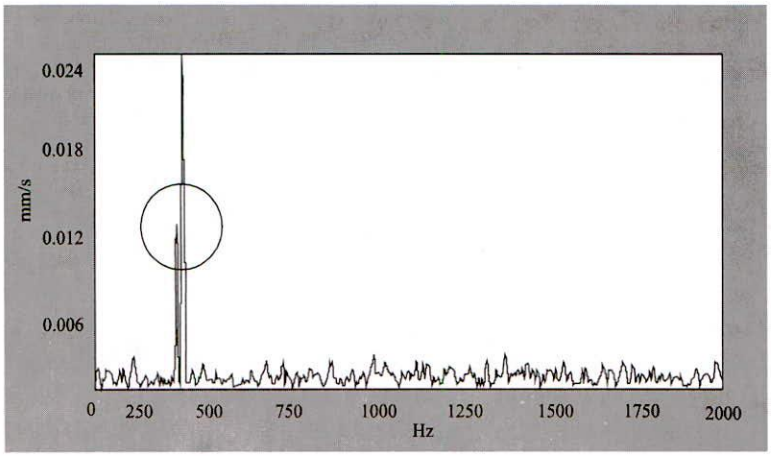


Figura 4.2.35
Espectro típico de holgura mecánica entre aro interno de rodamiento y su eje.

Problemas de Lubricación en Rodamientos

La falta de lubricación o la lubricación inadecuada[1], produce la mayor cantidad de daños en los cojinetes antifricción. Por medio del análisis de vibraciones es posible detectar fallas en la película lubricante con suficiente antelación y tomar medidas correctoras que retarden el daño. Los síntomas suelen manifestarse en el espectro por un conjunto de crestas que van desde los 5 kHz a los 10 kHz, dependiendo si la lubricación del rodamiento es con aceite o grasa. Si la lubricación es con grasa, las amplitudes pueden llegar hasta los 0,2 G, mientras que en lubricación con aceite serán admisibles valores de hasta 0,1 G en el peor de los casos. A continuación se muestran dos espectros típicos de falla en la película lubricante para ambos tipos de lubricación.

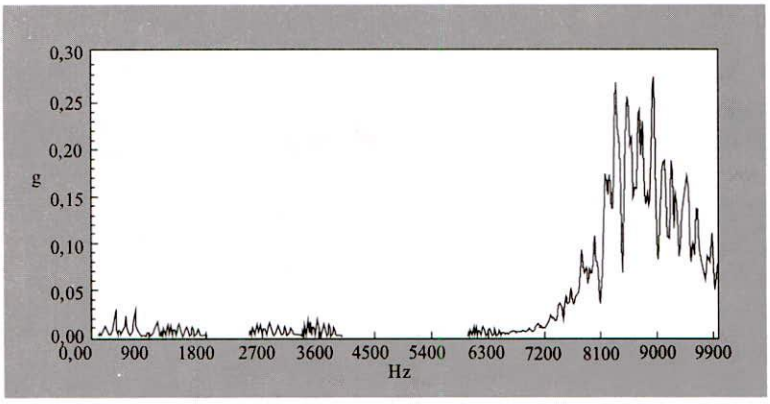


Figura 4.2.36
Espectro de aceleración con falla en película lubricante de aceite.

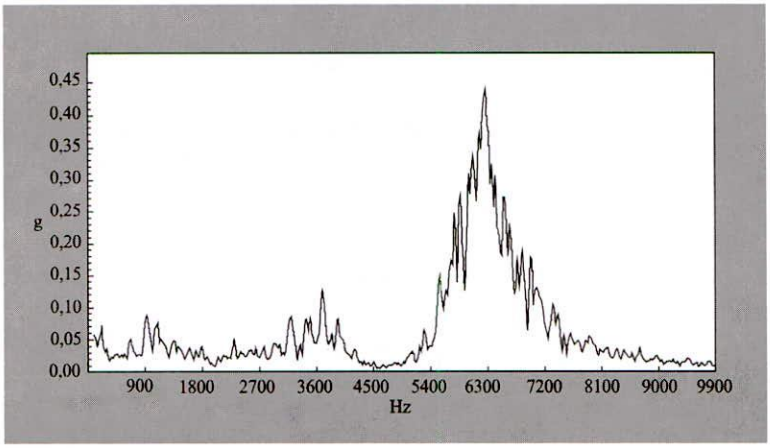


Figura 4.2.37
Espectro de aceleración con falla en película lubricante de grasa.

1 Ver sección 4.4 "Tribología y Análisis de Aceites".

En la figura siguiente vemos un problema combinado de defecto en un rodamiento y su lubricación (por aceite). Se aprecia que los síntomas de lubricación inadecuada se dejan ver por encima de los 5 kHz.

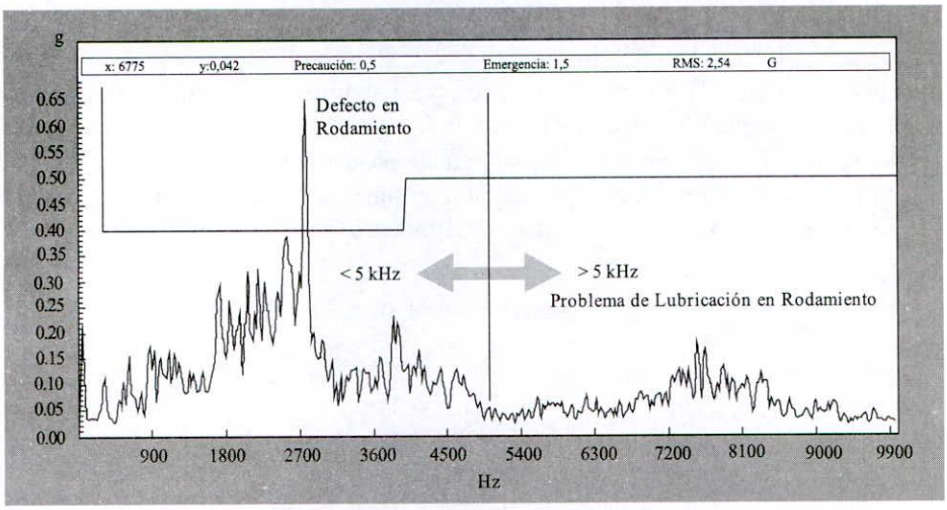


Figura 4.2.38 Espectro típico de falla en rodamiento y su lubricación.

Alternativas al diagnóstico de problemas en rodamientos

Se han encontrado algunas alternativas que sugieren mayor practicidad y economía para el diagnóstico de problemas en rodamientos. Una de ellas es la detección a través de la energía espectral emitida (SEE) o energía acústica emitida, que indica el estado general del rodamiento procesando únicamente los efectos acontecidos en alta frecuencia. Estos instrumentos, presentados comercialmente en forma de "lápiz", dan un valor escalar proporcional al daño en el rodamiento, principalmente por lubricación inadecuada. La medición se realiza en la zona de mayor carga y su ventaja es que requiere poca experiencia. Sin embargo, el inconveniente radica en que el instrumento analiza **todas** las altas frecuencias y no siempre la única fuente emisora de estas señales son los rodamientos. Esto puede inducir a decisiones de intervenir equipos cuya falla no se encuentra localizada justamente en sus rodamientos. Una relubricación permitiría descartar un daño si el valor de SEE disminuye al lubricar.

Lo correcto es tener valores de referencia "buenos" (inherentes al buen funcionamiento) para cada punto y compararlos con las consecutivas lecturas de campo. La tabla 4.2.3 ilustra un rango de valores referenciales de SEE para el diagnóstico de defectos. En todos los casos estas magnitudes son orientativas pues, en rigor, dependen del tipo, marca comercial y rango de frecuencias monitoreado.

Valor SEE	Causa probable
0 - 5	Funcionamiento normal.
5 - 25	Problemas de lubricación, contaminación, o defecto incipiente de rodamiento con baja carga.
25 - 75	Problemas de lubricación, contaminación, o defecto incipiente de rodamiento con alta carga.
75 -125	Defecto manifiesto en rodamiento o seria contaminación del lubricante.
> 125	Problema severo de rodamiento.

Tabla 4.2.3 Valores de referencia para las lecturas de SEE.

Otras técnicas monitorean las frecuencias intermedias (1-5 kHz). La técnica de *Demodulación* o *Envolvente de Aceleración* y la técnica del *Peakvue*[1] (valor de pico) resultan ser más útiles que el análisis espectral tradicional para rodamientos que giran a baja velocidad. La demodulación procesa las armónicas producidas en cierto rango de frecuencias. Por su parte, tanto el análisis con *Zoom Real* (aumenta la resolución) para zonas resonantes como el análisis del *Factor de Cresta* (aún en una banda ancha de frecuencias) son de gran utilidad en el diagnóstico de anomalías en rodamientos.

1 El Peakvue Analysis es una técnica de análisis patentada por la firma Computational System Incorporated (CSI).

Se agregan al arsenal de herramientas para el diagnóstico de rodamientos, algunas técnicas que enfocan la zona de altas frecuencias como los análisis de *Pulsos de Choque* (SPM), la *Emisión Acústica*[1] (AE), *Detección de Alta Frecuencia* (HFD) y *Ultrasonido*.

Análisis Orbital

Una alternativa para observar el comportamiento de ejes en movimiento montados en cojinetes de fricción (lubricación hidrodinámica), lo constituye el *análisis de órbita*. Ubicando dos sensores de proximidad (corriente de eddy) a 90° en los extremos de apoyo, se puede evaluar la trayectoria media descripta por el centro del eje en un plano transversal al eje de rotación. Permite diagnosticar el nivel de desbalanceo que presenta el rotor por medio de la forma que adquiere la órbita desarrollada por éste.

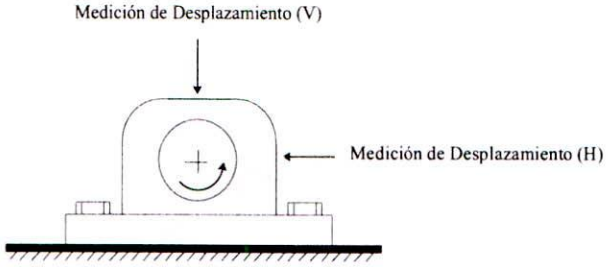


Figura 4.2.39
Mediciones de desplazamiento ortogonales para el análisis orbital.

El analizador de órbita grafica los valores de desplazamiento leídos por los sensores. Si el rotor no presenta desbalanceo (o sólo el residual), la forma de la órbita será como la indicada por la figura 4.2.40 a (elíptica). Por el contrario, si existe desbalanceo forzado por alguna fuerza (masa) excitadora, la órbita aparecerá como muestran los gráficos b y c. La figura 4.2.40 c identifica un desbalanceo más severo.

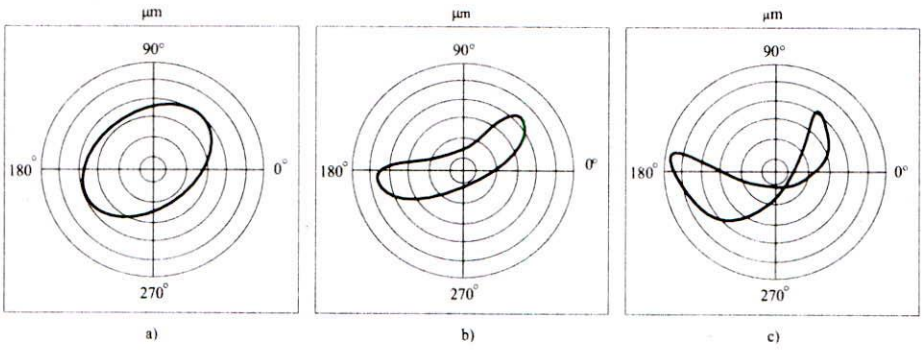


Figura 4.2.40
Diagrama de órbita para rotores.

1 Ver "Otras Técnicas Condicionales", sección 4.5.

Valor relativo de las mediciones según síntoma de falla									
Efecto (Velocidad)	**RMS**	**Radial (V)**	**Radial (H)**	**Axial (A)**	**Frontal (F)**	**Transversal (T)**	**Axial (A)**	**Fase**	**Observaciones**
Desbalanceo (Máquina Horizontal)	Radial - Alto.	1X - Alto. Armónicas bajas. Desbalanceo proporcional al valor de 1X.	1X - Alto. Levemente superior a la medición Radial (V). La fase a 90° con Radial (V) en el mismo extremo.	1X - Bajo. Para máquinas en voladizo, 1X - Alto.	--	--	--	Desbalanceo Estático: Extremos opuestos en fase. Para máquinas en voladizo 1X Axial en fase de ambos extremos.	Con la 1X elevada, las 2X, 3X, 4X bajas.
Desbalanceo (Máquina Vertical)	Radial (F) - Alto.	--	--	--	1X - Alto. La fase a 90° con Radial (T) en el mismo extremo.	1X - Medio	1X - Bajo	--	Con la 1X elevada, las 2X, 3X, 4X bajas.
Desalineación Angular	Axial - Alto.	1X, 2X - Medio / Bajo. Levemente superior a la medición Radial (H).	1X y 2X - Medio / Bajo.	1X y 2X - Alto. 3X - Medio. La medición en 1X suele ser > 1,5 veces la Radial.	1X y 2X - Medio / Bajo.	1X y 2X - Medio / Bajo.	1X y 2X - Alto. 3X - Medio. La medición en 1X suele ser > 1,5 veces la Radial.	Axial: 180° a través del acople.	Medición Axial (A) mayor que Radiales.
Desalineación Paralela	Radial - Alto.	1X, 2X - Alto. Armónicas - Medio.	1X, 2X - Alto. Armónicas - Medio.	1X y 2X- Bajo	1X, 2X - Alto. Armónicas - Medio.	1X, 2X - Alto. Armónicas - Medio.	1X y 2X - Bajo	Radial: 180° a través del acople.	Medición Axial (A) menor que Radiales.
Eje Doblado (desacoplado)	Axial - Alto, (algo menor que en la desalineación).	1X y 2X - Medio / Bajo. Levemente superior a la medición Radial (H).	1X y 2X - Medio / Bajo	1X - Alto. 2X y 3X - Bajo.	1X y 2X - Medio / Bajo.	1X y 2X - Medio / Bajo.	1X - Alto. 2X y 3X - Bajo.	Axial: 180° a ambos lados del eje. Radial: en fase a ambos lados del eje.	Las 2X y 3X aumentan con el incremento de las rpm.
Resonancia	Radial - Alto.	1X de Velocidad Crítica - Alto.	1X de Velocidad Crítica - Alto.	1X - Bajo.Para máquinas en voladizo, 1X - Alto.	1X de Velocidad Crítica - Alto.	1X de Velocidad Crítica - Alto.	--	Radial: 180° antes y después de la zona de resonancia.	Un leve aumento en las rpm produce una disminución en la amplitud de la señal.
Solturas Mecánicas	Radial - Alto. Axial - Bajo.	1X > a lo normal y superior a la Radial (H). En ocasiones la 2X puede llegar a ser > a 2 veces 1X.	1X > a lo normal e inferior a la Radial (V)	Altas armónicas a partir de 2X hasta 10X. Posible subarmónica en 1/2X.	--	--	--	Radial Vertical: 180° entre anclaje y soportes.	La amplitud de las armónicas decrecen con el aumento de la frecuencia.
Oil Whirl	Radial - Medio / Bajo.	De 1/3X a 1/2X > a lo normal. Levemente superior a la medición Radial (H).	De 1/3X a 1/2X > a lo normal.	Bajo	--	--	--	Inestable.	--
Excentricidad (Poleas y Engranajes)	Radial - Alto.	1X de las rpm de polea excéntrica - Alto.	--	Bajo	1X de las rpm de polea excéntrica - Alto.	--	Bajo	--	Mayor amplitud Radial en la dirección entre centros de las poleas.
Problemas en Correas ó Bandas	Radial - Alto.	$1X f_{PC}$ - Alto.	$1X f_{PC}$ - Alto.	--	$1X f_{PC}$ - Alto.	$1X f_{PC}$ - Alto.	--	--	Mayor amplitud Radial en la dirección de tensión de las correas.
Problemas de Flujo	Radial - Alto.	$1X f_{Pf}$ - Alto.	$1X f_{Pf}$ - Alto.	--	$1X f_{Pf}$ - Alto.	$1X f_{Pf}$ - Alto.	--	--	--

Tabla 4.2.4
Resumen de parámetros para diagnóstico de síntomas.

Valor relativo de las mediciones según síntoma de falla							
Efecto (Velocidad)		**RMS**	**Radial (V)**	**Radial (H)**	**Axial (A)**	**Fase**	**Observaciones**
Problemas en Motores Eléctricos de Inducción	En Rodamientos	--	--	--	--	--	Ver "Problemas en Rodamientos"
	Desbalanceo y Resonancia	Radial - Alto (Siempre respecto a un valor de referencia).	1X - Alto	1X - Alto	1X - Bajo	En fase entre extremos.	Lectura tomada sin alimentación eléctrica.
	Rotura de barras de rotor.	Radial - Alto	1X - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X. 1X $2f_L$ - Alto	1X - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X. 1X $2f_L$ - Alto.	1X - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X. 1X $2f_L$ - Alto.	--	Con carga nominal.
	Cortocircuito en el bobinado del estator	Radial - Alto	1X - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X. 1X $2f_L$ - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X $2f_L$.	1X - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X.1X $2f_L$ - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X $2f_L$.	1X - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X. 1X $2f_L$ - Alto. Banda lateral a f_{PP} de 1X $2f_L$.	--	Con carga nominal.
	Pulsos Torcionales	Radial - Bajo	1X $2f_L$ - Alto (Respecto a un valor de referencia)	1X $2f_L$ - Alto (Respecto a un valor de referencia).	--	--	Con carga nominal.
Problemas en Engranajes	Defectos en dientes de engrane (superficie deslizante).	Radial y Axial - Alto.	1X f_e y armónicas 2° y 3° - Alto.	1X f_e y armónicas 2° y 3° - Alto.	1X f_e y armónicas 2° y 3° - Alto.	--	Para observar las armónicas se requieren analizadores de alta resolución.
Problemas en Rodamientos	En sus frecuencias específicas (f_{PI}, f_{PE}, f_{ER} y f_I).	En la dirección de mayor carga - Alto. Generalmente < 5 kHz	1X de la frecuencia específica - Alto. Espectro con varias componentes a < 5 kHz	1X de la frecuencia específica - Alto. Espectro con varias componentes a < 5 kHz	1X de la frecuencia específica - Alto. Espectro con varias componentes a < 5 kHz	--	Ubicar el sensor en la dirección de mayor solicitación para el rodamiento.
	Por lubricación.	En la dirección de mayor carga - Alto. (entre 5 y 10 kHz).	Espectro con varias componentes elevadas entre los 5 y 10 kHz.	Espectro con varias componentes elevadas entre los 5 y 10 kHz.	Espectro con varias componentes elevadas entre los 5 y 10 kHz.	--	Ubicar el sensor en la dirección de mayor solicitación para el rodamiento.

Tabla 4.2.4
Resumen de parámetros para diagnóstico de síntomas (continuación).

4.2.6 Valores de Operación y Diagnóstico (Nominal, Alerta y Alarma)

Todo lo analizado hasta el momento es válido siempre que exista una referencia certera de cuáles son los valores de buen funcionamiento de la máquina. Debido a la complejidad de los mecanismos rotantes y a los infinitos contextos operativos a los que pueden estar sometidos, se hace difícil establecer valores absolutos que no tengan que ser verificados en la práctica. Cada punto de medición tendrá (para todos los parámetros medidos) un valor de referencia que será ajustado en función de la experiencia del analista. Lo habitual es establecer la magnitud de buen funcionamiento (valor nominal) y comparar todas las lecturas consecutivas con dicho valor, siempre bajo las mismas condiciones de operación. Cualquier cambio en el contexto operativo (velocidad, carga, temperatura, régimen de marcha, etc.) hará que las condiciones de solicitación varíen y las magnitudes nominales ya no podrán tenerse en cuenta para establecer el estado de condición de la máquina.

Los analizadores actuales permiten programar los valores de referencia nominal para todos los puntos de captura de datos, y también las magnitudes de alerta y alarma. Esto resulta de mucha utilidad dado que, generalmente, las anomalías presentan estados intermedios de deterioro (fallas sintomáticas) hasta la avería catastrófica (falla funcional). Por de pronto se tendrán tres valores, *nominal, alerta y alarma*. Algunos autores denominan al valor nominal como valor "bueno". Una aproximación válida como referencia o como punto de partida para el diagnóstico, es la norma ISO 2372 (Ver Anexo III).

Es común superponer en los espectros los límites de alerta y alarma simultáneamente. Se denominan **alarmas de nivel** y especifican la amplitud máxima permitida para algún pico dentro de la banda escogida. Si el pico supera el nivel, se activa la alarma. La figura 4.2.41 muestra un espectro de velocidad característico con las magnitudes de alerta y alarma sobreimpresas.

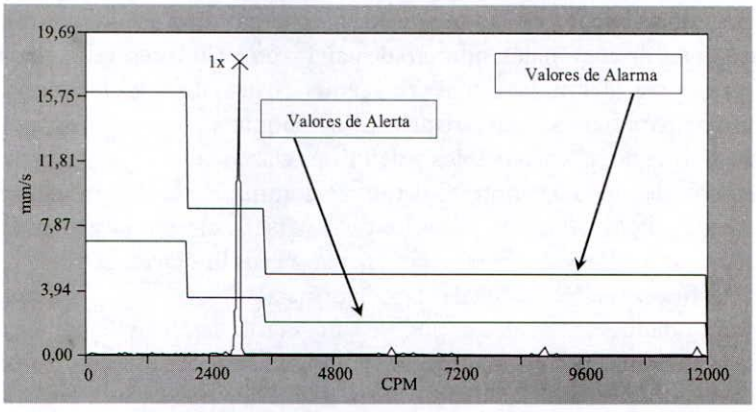


Figura 4.2.41
Límites de alerta y alarma en un espectro de velocidad.

Obsérvese que en los dos casos los valores de alerta y alarma cambian en función del rango de frecuencia. La precaución es que todas las mediciones posteriores deben respetar el mismo rango y fondo de escala. Se utilizan también las alarmas de **Potencia de Banda**. Calculan la energía total generada en cada banda por todas las crestas (utilizando el mismo cálculo que para el valor global). Esto es esencial para monitorear rangos específicos de frecuencias e identificar defectos en rodamientos y engranajes, o bien para el diagnóstico de equipos que trabajan con velocidad variable. En lo que respecta al desbalanceo, la norma ISO 1940[1] califica este fenómeno según las fuerzas que actúan sobre el rotor. La severidad del desbalanceo se mide en gr mm/Kg, y cuantifica de forma relativa la fuerza de desbalanceo (masa) con la masa del rotor.

$$D_r = \frac{m_d \times r}{M_r} \qquad (4.2.8)$$

Donde m_d es el exceso de masa (desbalanceo), r la distancia de dicha masa al centro del rotor y M_r, la masa del rotor.

---

1 Ver Anexo III.

Finalmente, y una vez establecido el valor nominal más adecuado, se sugiere el seguimiento con **diagramas de tendencia** para cada punto de monitoreo como el mostrado por la figura 4.2.42.

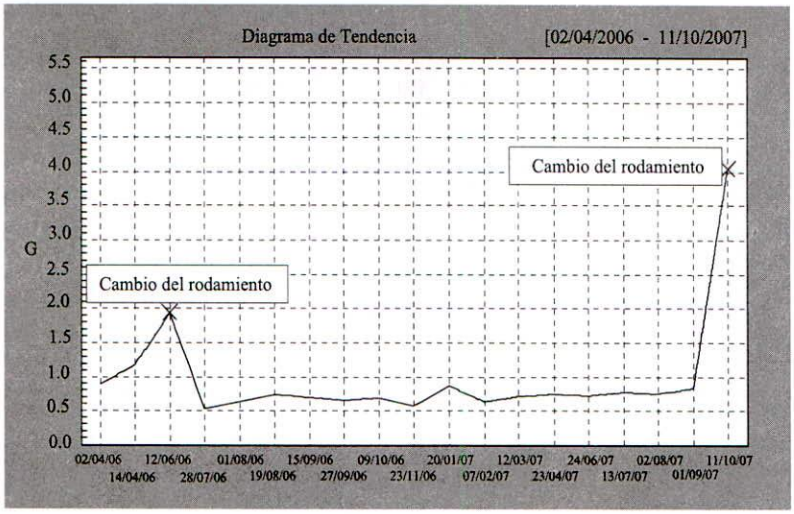


Figura 4.2.42 Diagrama de tendencia para la medición del valor RMS de un rodamiento.

4.2.7 Consideraciones y Recomendaciones Finales

Se resumen a continuación las consideraciones más importantes al momento de implementar un monitoreo periódico de vibraciones y su análisis posterior.

- √ Reunir la mayor cantidad de información referida al sistema como ser, identificación de rodamientos, número de dientes de engranajes, número de paletas en los rotores, velocidad de rotación, polos de motores eléctricos, etc. Definir las frecuencias características de cada elemento; las mismas constituyen el conjunto de parámetros característicos de la máquina.
- √ Seleccionar parámetros de salida **sensibles** y definirlos claramente.
- √ Para cada parámetro de salida, encontrar los valores nominales, de alerta y alarma.
- √ Asegurar que el intervalo Δt_{SF} exista en todos los casos, ajustar su valor de acuerdo a la experiencia.
- √ Tener en cuenta que el Análisis de Vibraciones encuentra sus limitaciones para el caso de fatiga y fenómenos térmicos (fuerzas estáticas axiales por deformación)[1].
- √ Dado el nivel de automatización actual, es posible aumentar la cantidad de puntos a monitorear o aumentar la frecuencia de inspección sin incrementar significativamente los costos. Esto aumenta la cantidad de fallas sintomáticas descubiertas antes de convertirse en una falla funcional. De igual forma, siempre debe efectuarse un análisis costo – beneficio. Se estima que para frecuencias de inspección mensuales, el Análisis de Vibraciones tiene una eficiencia del 92%, asumiendo idoneidad en la inspección y diagnóstico.
- √ La recolección de datos debe reunir dos características, alta repetibilidad y alta densidad de información. Ubicar los sensores de manera exactamente igual cada vez que se hace una lectura. Utilizar superficies planas y evitar excitaciones transversales y ruidos intensos sobre el acelerómetro. No medir dentro de campos magnéticos o con exceso de temperatura.
- √ De requerirse bloques de montaje (aditamentos de planitud) se instalarán con adhesivos compuestos de alta rigidez, como el comercialmente utilizado Versiblok TM®.
- √ Realizar siempre comparaciones de espectros o valor global sobre el mismo punto y bajo las mismas condiciones de velocidad y carga (mismo contexto operativo).
- √ Colocar el senso-transductor lo más cerca posible de los elementos a controlar.
- √ Procurar siempre mediciones triaxiales.

---

1 SEMAPI S.A. Servicios y Equipamiento para mantenimiento predictivo. www.semapi.com.ar

- √ Establecer valores de alerta y alarma en base a las normas ya mencionadas. De todas formas, ajustar las magnitudes en función de los datos recolectados en las lecturas de campo.
- √ Frente a problemas de alineación o balanceo, la restauración a la condición básica debe ser inmediata.
- √ Para la instalación de nuevos activos, realizar siempre un test de aceptación basado en las normas ISO (o similares).
- √ Mantener actualizados los gráficos de tendencias; en máquinas prioritarias se aconseja llevar una gestión visual a través de gráficos publicados en las cercanías del activo.
- √ Evitar los rediseños que involucren aumento de rigidez en las fundaciones, esto podría provocar mayores daños en ciertos componentes del sistema. Sólo sería razonable aumentar la rigidez cuando el sistema se encuentra en resonancia.
- √ Implementar técnicas de seguimiento sobre el estado de lubricación en rodamientos; son relativamente económicas en relación a los beneficios que otorgan.
- √ Complementar los análisis espectrales con maniobras pro-activas de alineación y balanceo. Hacer lo propio con los análisis de aceite usado. En reductores de velocidad, da muy buenos resultados la combinación de ambas técnicas.
- √ El personal de mantenimiento debe estar entrenado y bajo capacitación permanente, lo que genera motivación y compromiso.

Escapan al alcance de este trabajo las técnicas utilizadas para contextos de carga y velocidad variable. En ellas, se utilizan analizadores de orden (order tracking) o transformadas tiempo – frecuencia, entre otras.

4.3 Termografía Infrarroja

El diagnóstico por termografía infrarroja es claramente una tarea de mantenimiento basada en condición (predictiva). Su campo de aplicación es muy amplio y, en la actualidad, son cada vez más los rubros industriales que hacen uso de esta tecnología. Un termograma detecta fallas sintomáticas *(puntos fríos o calientes)*, por lo general irreversibles, a través del espectro de temperaturas de los componentes.

La Termografía Infrarroja permite, sin contacto, conocer la temperatura superficial de un cuerpo midiendo su nivel de radiación en la región del infrarrojo; vale decir, el universo térmico observable.

Siendo que el exceso de temperatura (por encima de los límites normales de operación) es un síntoma de falla, es factible estudiar la evolución térmica de un elemento y anticiparse a la avería catastrófica programando su reemplazo o reparación. Junto a otras herramientas como análisis de lubricantes, análisis de vibraciones, ultrasonido, partículas magnéticas, emisión acústica, tensiones residuales, etc. tiene la ventaja que no es preciso retirar de servicio el equipo durante la inspección.

4.3.1 Alcance y objetivos de la Termografía Infrarroja

Tanto en el ámbito industrial como fuera de él, es variado el campo de aplicación. Se utiliza en disciplinas como astronomía, oceanografía, medicina, agronomía, meteorología, aplicaciones militares, ingeniería de procesos, arte plástico, etc.

En la especialidad eléctrica, por ejemplo, una operación de rutina en mantenimiento era limpiar y ajustar conexiones, bornes o contactos sueltos. Así, todos los elementos se sometían al mismo mantenimiento *(preventivo)* aunque no lo requiriesen, con el inconveniente adicional de la posible incorporación de fallas prematuras *(mortalidad infantil)* por errores de montaje, ajuste o calibración. Es común escuchar, *"...el componente funcionaba correctamente hasta que se lo intervino"*.; se trataba de un sistema estable que fue alterado.

Con ayuda de esta tecnología pueden detectarse fallas sintomáticas severas sin necesidad de afectar la continuidad operativa de la máquina (recordar del Capítulo 1 que, en mayor o menor medida, toda acción de mantenimiento es invasiva).

Esta clase de monitoreo persigue básicamente dos objetivos.

√ Detectar fallas sintomáticas y tomar alguna decisión antes de llegar a la falla funcional. Téngase en cuenta que el calor, en cantidad superior a la tolerada por el sistema, es causa de averías en todo tipo de equipamiento.

√ Reducir los costos ocultos por lucro cesante y los costos directos de mantenimiento, porque se cuenta con más tiempo para programar las reparaciones. Se disminuyen las tareas correctivas por emergencia y el consumo de repuestos en forma imprevista.

El intervalo Δt_{SF} es muchas veces consistente y de suficiente utilidad para justificar una rutina de mantenimiento predictivo por termografía infrarroja.

4.3.2 Transmisión del Calor

Conocido es que la energía térmica (calor) se transmite de tres maneras diferentes.

√ Por **conducción**: El calor fluye en el interior de los cuerpos por agitación térmica de sus moléculas y sin transporte de materia, en el sentido de las temperaturas decrecientes.
Ejemplo: calentamiento de un elemento metálico desde un extremo.

√ Por **convección**: Los fluidos son los encargados de transmitir el calor por convección. Se dice que bajo esta forma de transmisión hay transporte de materia (los propios fluidos en movimiento).
Ejemplo: Enfriamiento de un radiador de automóvil.

√ Por **radiación**: Se transmite aún en el vacío y, consecuentemente, sin transporte de materia. La energía se transmite por medio de ondas electromagnéticas que al incidir sobre la superficie de los objetos, elevan su temperatura.
Ejemplo: La energía térmica radiante del Sol que llega a la superficie de la Tierra.
Dado que la radiación puede transmitirse en el vacío, dos cuerpos dentro de un mismo recipiente (al vacío e idealmente adiabático) igualarían su temperatura al cabo de cierto tiempo aún no existiendo contacto entre ellos.

La técnica predictiva de **termografía infrarroja** requiere comprender someramente el proceso de transmisión del calor por **radiación**.

4.3.3 Espectro Electromagnético

El conjunto de todas las radiaciones electromagnética del universo conocido, se denomina **espectro electromagnético**. El fenómeno de radiación transporta energía y dicho transporte se lleva a cabo por medio de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz. Una onda electromagnética es una magnitud vectorial con dos componentes (campo magnético y campo eléctrico) en fase y perpendiculares entre sí y, a su vez, normales a la dirección de propagación de la onda. La teoría física ondulatoria establece que toda onda electromagnética que se propaga en el vacío queda definida por su longitud de onda (λ_0) y su frecuencia de oscilación (f); el producto de ambas es la velocidad de la luz en el vacío (c_0), aproximadamente 3 x 10^5 Km/seg.

$$c_0 = \lambda_0 . f \qquad 4.3.1$$

Sin embargo, la velocidad de la luz en el vacío es una constante e igual a:

$$c_0 = \frac{1}{[\eta_0 . \mu_0]^{1/2}} \qquad 4.3.2$$

Donde η_0 es la permisividad eléctrica y μ_0 la permeabilidad margnética del medio (el vacío en este caso).

La frecuencia de la radiación electromagnética no varía si sobreviene un cambio en el medio de propagación (aire, agua, vidrio, etc.), pero sí cambia la longitud de onda (λ) y la velocidad de propagación (c). De modo que la velocidad de propagación en cualquier medio homogéneo queda establecida por:

$$c = \lambda . f = \frac{1}{[\eta . \mu]^{1/2}} \qquad 4.3.3$$

En la que η es la permisividad eléctrica y μ la permeabilidad margnética del medio material dentro del cual se propaga la onda electromagnética. Si en la trayectoria de la onda se produce un cambio en el medio de propagación, se mantiene la proporcionalidad entre estas dos magnitudes y la longitud de onda, permaneciendo constante la frecuencia.

Los actuales equipos de termografía corrigen automáticamente la diferencia entre la longitud de onda en el vacío y en el aire, dependiente del índice de refracción de éste último. Así, se evitan errores con respecto a la frecuencia de la radiación medida.

La radiación también puede entenderse a través de la teoría corpuscular propuesta por Max Planck[1] en el año 1900. La misma refiere que la energía se transporta en forma de fotones (partículas de masa nula) que viajan a la velocidad de la luz. La frecuencia de los fotones es función del nivel de energía transmitido. A mayor frecuencia, mayor energía transportada por el fotón. La relación entre la frecuencia del fotón y la energía que éste transporta, es proporcional a la constante de Planck.

$$e = h.f \qquad 4.3.4$$

---

1 Max Karl Ernst Ludwing Planck (1858-1947) nació en Kiel, Alemania. En 1900 enunció que la energía se radia en pequeñas unidades individuales llamadas "cuantos" y estableció que la energía de cada cuanto es igual a la frecuencia de la radiación multiplicada por una constante universal que lleva su nombre, h = 6,6256 x 10^{-34} Joule.S.

El espectro electromagnético es muy extenso. Hasta lo conocido, abarca ondas de alta frecuencia (10^{22} Hz) y pequeña longitud de onda (10^{-14} m) como los Rayos X y Rayos Gamma, hasta ondas largas de radio de baja frecuencia (10^{2} Hz) y gran longitud de onda (10^{6} m). Se lo estudia dividiéndolo en regiones y subregiones, según frecuencia y longitud de onda.

Las tres zonas principales, y sólo por cuestiones antropocéntricas[1], son:

- √ Zona anterior al visible (Rayos X, ultravioleta, etc.) que agrupa aquellas radiaciones con longitudes de onda inferiores a 0,38 μm. Las radiaciones con longitud de onda inferior a 0,01 μm tienen la capacidad de atravesar, y en algunos casos, ionizar la materia.
- √ Zona del visible o luminosa (detectable por la retina) constituida por las radiaciones cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 0,38 y 0,76 μm aproximadamente.
- √ Zona posterior al visible (infrarrojo, microondas, radio, etc.) cuyas longitudes de onda son superiores a 0,76 μm.

Por conveniencia, para expresar la longitud de onda (λ) en cada subregión, se utilizan distintas unidades que facilitan el manejo de los números. Mientras en la radiofonía la longitud de onda suele expresarse en metros, en el infrarrojo se emplea el micrón (1 μm = 10^{-6} m). En la subregión del visible la unidad más comúnmente utilizada es el Angström (1 A^0 = 10^{-10} m). La relación entre estas magnitudes se resume como sigue.

$$1 \text{ micrón } (1\ \mu m) = 10^{-6}\,m = 10^{3}\,nm = 10^{4}A^{o}$$

La figura 4.3.1 muestra los límites establecidos por cada región y subregión del espectro.

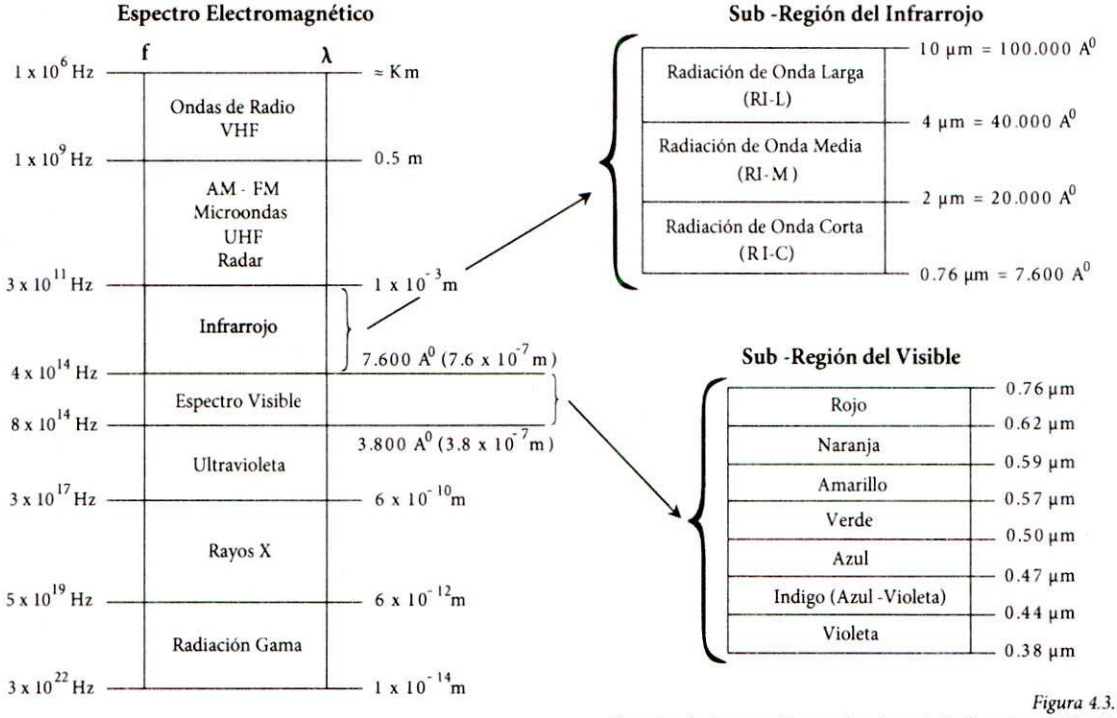


Figura 4.3.1
Espectro electromagnético y subregiones del Infrarrojo y del Visible.

La subregión de rayos Gamma contiene ondas electromagnéticas producidas por sustancias radioactivas de alta energía (hasta 10^{7} eV[2]). Los rayos X son capaces de traspasar la materia y su energía alcanza los 2,2 x10^{5} eV, aproximadamente. En esta región aparece también la radiación ultravioleta con menos energía que las anteriores.

---

1 La región del visible ocupa una pequeña porción de todo el espectro electromagnético (0,38 a 0,76 μm). Siendo el hombre quien define tales regiones, se establecen tres zonas: "antes del visible (alta frecuencia)", "el visible" y "más allá del visible (baja frecuencia)".

2 Un electron volt es la energía absorbida por un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un volt, (1 eV = 1,6022 x 10^{-19} Joules).

El visible constituye la zona más estrecha del espectro y perceptible al ojo humano. El rango de longitudes de onda se encuentra entre los 3.800 y los 7.600 A^0. La zona de interés para la termografía infrarroja, denominada **región RI**, agrupa las ondas electromagnéticas producidas por la emisión de los cuerpos *calientes*. Todo cuerpo cuya temperatura es mayor al cero absoluto (0 °K = - 273,16 °C) emite energía (calor) por radiación.

Esta región se divide a su vez en tres subregiones (ver tabla 4.3.1): infrarrojo cercano o de onda corta (RI-C) y próximo al rojo, infrarrojo medio (RI-M), e infrarrojo lejano o de onda larga (RI-L) y más alejado del visible. La energía de los fotones va desde 1,6 a 10^{-3} eV y la frecuencia de 4 x 10^{14} a 3 x 10^{11} Hz, aproximadamente[1].

La zona de microondas decrece en energía respecto a las anteriores, y las ondas tienen una longitud de hasta 0,5 m. La última subregión (dentro de la cual se encuentran las ondas de radio), transporta menos cantidad de energía y se caracteriza por una baja frecuencia de oscilación.

Conviene destacar, sin embargo, que las regiones y subregiones del espectro electromagnético no tienen límites precisos.

4.3.4 Radiación Térmica

Toda onda electromagnética cuya longitud de onda se encuentra en 0,76 y 10μm, corresponde al espectro infrarrojo **RI**.

Tipo de Radiación	Longitud de onda (λ)
Onda Corta (RI-C)	0,76 a 2 μm
Onda Media (RI-M)	2 a 4 μm
Onda Larga (RI-L)	4 a 10 μm

Tabla 4.3.1
División de la subregión Infrarroja.

Los cuerpos emiten y reciben simultáneamente energía térmica; cuando la cantidad de energía que emite un cuerpo es mayor a la que recibe, se trata de un cuerpo caliente. En el año 1801 Sir Frederick William Hershel[2] observó que la radiación tiene, desde un punto de vista físico, un comportamiento de refracción y reflexión análogo a la luz visible y la llamó *rayos calóricos*. Se denomina radiación infrarroja porque en el espectro electromagnético la frecuencia de la onda se encuentra por debajo de la correspondiente al rojo.

La energía térmica emitida por un cuerpo se llama *energía radiante* o *radiación térmica* y es función de su temperatura; cuanto más caliente se encuentre el objeto, mayor será la energía que emite por radiación. Como se dijo, la velocidad de transmisión del calor por radiación es la velocidad de la luz (≈ 3 x 10^5 Km/seg). Si bien la velocidad de transmisión del calor por radiación es mayor que por convección y conducción, no ocurre lo mismo con la cantidad de calor que depende de la temperatura del cuerpo. A baja temperatura, la cantidad de calor transmitida por convección o conducción es mayor, aunque a menor velocidad.

A baja temperatura (menos de 600 °C) la energía radiante emitida tiene longitudes de onda comprendidas exclusivamente en la subregión del infrarrojo (0,76 a 10 μm). Conforme el cuerpo se calienta, emite radiaciones más intensas de menor longitud de onda que pertenecen a la extremidad roja del espectro (los cuerpos por encima de esta temperatura adquieren un color rojizo y *se dejan ver térmicamente*). Inclusive calentando aún más, emiten radiación desde el rojo al violeta. Así, la temperatura superficial determina el tipo de luz que emite; cuanto más frío esta el objeto, mayor es la longitud de onda en la que brilla y *"se esconde en el infrarrojo"*.

4.3.4.1 Ley de Planck

Cuando un cuerpo se calienta emite isotrópicamente energía térmica desde la superficie y la cantidad de energía que radia es función de su temperatura y de la longitud de onda[3]. La radiación es emitida por todo el cuerpo pero, en general, la proveniente del interior vuelve a ser absorbida y se libera solamente la energía correspondiente a una delgada capa superficial. Se asume que los cuerpos en su interior transmiten la energía térmica únicamente por conducción.

---

1 "Radiación Infrarroja y Ultravioleta, Tecnología y Aplicaciones". Ángel Valea Pérez - Jesús M.a Alonso Girón.

2 Sir Friederick William Hershel (1738-1822) músico y astrónomo, nació en Hannover, Alemania.

3 En rigor esta definición es aplicable al concepto de "cuerpo negro". La emitancia espectral de los cuerpos reales ("grises") varía, además, con la dirección y el plano de polarización. Ver "Termodinámica Básica y Aplicada" pág. 302, I. Martínez. Madrid, Ed. Dosset, 1992

Ciertos objetos emiten más energía térmica por radiación que otros, aunque se encuentren a la misma temperatura. El tipo de material, la forma y la terminación superficial, influyen sobre esta característica. Es preciso contar, entonces, con una referencia universal de radiación térmica.

Se define **cuerpo negro** a aquel que, en equilibrio térmico, sería capaz de emitir o absorber la máxima energía térmica por unidad de superficie para un valor dado de temperatura absoluta T (°K). La ley de Planck establece que la energía térmica radiada (**emitancia espectral**) por el cuerpo negro a cierta longitud de onda (λ), puede calcularse a partir de la ecuación 4.3.5.

$$E_{n(\lambda;T)} = [\, A/\lambda^5 \,] \cdot \left[\frac{1}{e^{(B/\lambda T)} - 1} \right] \qquad 4.3.5$$

$E_{n(\lambda;T)}$ es la **densidad de energía** o **emitancia espectral** monocromática radiada (W/m^3) por el cuerpo negro a la temperatura T (°K) y a la longitud de onda λ (μm). A = 3,7418 x 10^{-16} $W.m^2$ y B = 1,4388 x 10^{-2} m.°K, son la primera y segunda constante de radiación respectivamente.

La figura 4.3.2 representa una familia de curvas para distintas temperaturas correspondientes a la ecuación 4.3.5. Obsérvese que el valor máximo de emitancia espectral en cada curva se desplaza hacia la izquierda con el aumento de temperatura. Es decir, la longitud de onda (λ) a la que se alcanza el máximo valor de radiación, disminuye conforme aumenta la temperatura del cuerpo. Este fenómeno se conoce como ley de los desplazamientos de Wien[1].

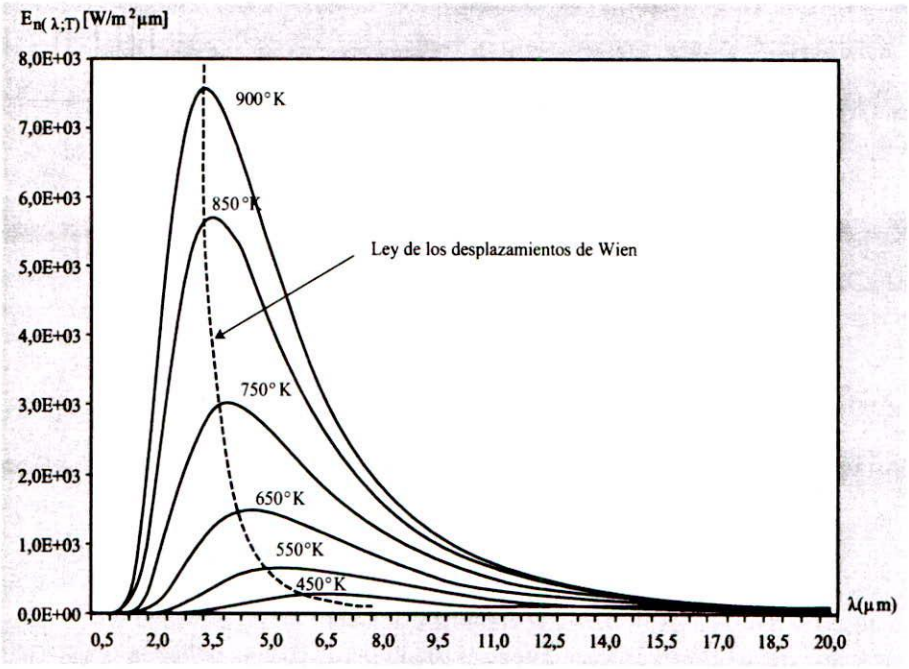


Figura 4.3.2 Distribución de la emitancia espectral radiada por un cuerpo negro según la ley de Planck.

4.3.4.2 Ley de los desplazamientos (Ley de Wien)

También conocida como ley de *los desplazamientos máximos*, surge de buscar el máximo valor de emitancia espectral dada por la ley de Planck; $[dE_{n(\lambda;T)}/d\lambda]_{T=cte} = 0$.

Así, se obtiene la longitud de onda que emite mayor radiación para cada temperatura o, lo que es lo mismo, la variación de la longitud de onda (λ) con la temperatura de la superficie radiante.

$$\lambda_{máxima} = \frac{2.897{,}8\ \mu m.°K}{T\ (°K)} \qquad 4.3.6$$

1 Wilhelm Wien (1864-1928) nació en Fischhausen, actual Polonia, y obtuvo el Premio Nobel de Física en 1911.

$\lambda_{máxima}$ es la longitud de onda para la máxima densidad de energía monocromática emitida a cada temperatura T (°K) del objeto radiante.

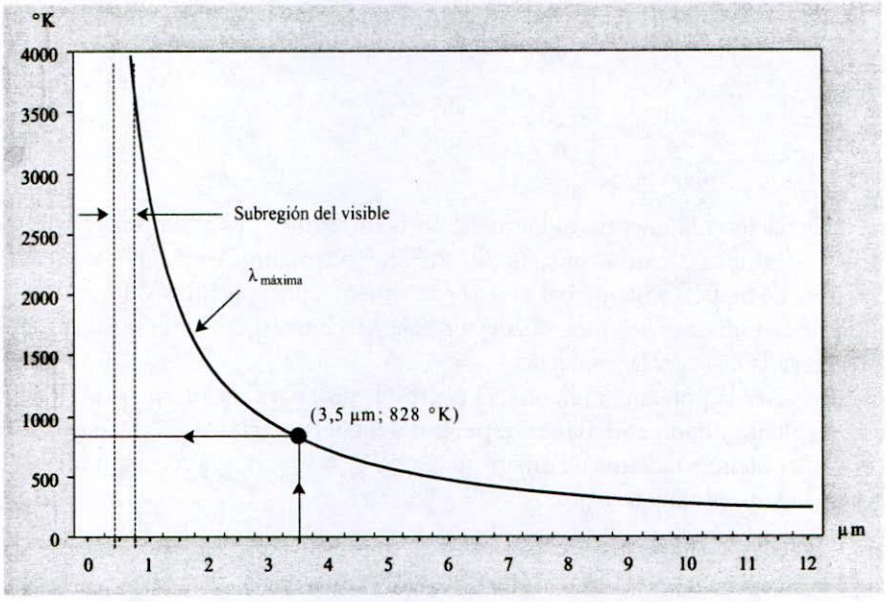


Figura 4.3.3 Ley de los desplazamientos o ley de Wien.

Por ejemplo, para una longitud de onda $\lambda_{máxima}$ = 3,5 µm, se tiene que la temperatura es T = 828 °K ≈ 555 °C. Con esta curva se ratifica el hecho que conforme aumenta la temperatura del objeto disminuye la longitud de onda a la que radia la mayor cantidad de energía $E_{n(\lambda;T)}$. Si la temperatura sigue aumentando, el cuerpo comenzará a emitir parte de la radiación en longitudes de onda lo suficientemente pequeñas como para *pisar* el visible, mostrándose color rojizo-anaranjado.

Los radiadores de incandescencia emiten radiación infrarroja del tipo RI-C (onda corta) al punto que parte de la radiación *se deja ver* en la subregión del visible. Por el contrario, los sistemas de calefacción central denominados de *losa radiante*, emiten mayormente en RI-L (onda larga).

Tanto el vidrio común como el agua (transparentes a la radiación luminosa) son muy poco transparentes a la radiación infrarroja (absorben gran cantidad de radiación RI por encima de los 2,5 µm). Motivo por el cual deben evitarse las imágenes con cámaras infrarrojas tomadas detrás de vidrios o ventanas de uso común. Para aquellas aplicaciones donde sea inevitable ubicarse detrás de un vidrio, deberán montarse cristales especiales *(ventanas infrarrojas)* transparentes a la radiación RI a base de $CaCO_3$ o Germanio (Ge).

4.3.4.3 Ley de Stefan-Boltzmann[1]

El área bajo cada una de las curvas de la figura 4.3.2 es la **emitancia espectral total** o **potencia radiante** (E_W) por unidad de área, generada por el cuerpo negro en todas las longitudes de onda y a la temperatura absoluta T considerada. Posee las mismas unidades que el flujo de calor, [W/m²] ó [Joule/(s.m²)].

1 Descubierta experimentalmente por Joseph Stefan (1835-1893) y deducida por Ludwing Boltzmann (1844-1906).

$$E_{W_{n(T)}} = \int_{T=cte}^{0} E_{n(\lambda;T)}\, d\lambda \qquad 4.3.7$$

$$E_{W_{n(T)}} = \int_{T=cte}^{0} [\, A/\lambda^5 \,] \cdot \left[\frac{1}{e^{(B/\lambda T)} - 1} \right] d\lambda \qquad 4.3.8$$

$$E_{W_{n(T)}} = \delta \cdot T^4 \qquad 4.3.9$$

Esta ecuación relaciona la energía radiante (de origen térmico) emitida por el cuerpo negro con la temperatura. δ es conocida como constante de Stefan-Boltzmann (δ = 5,6697 x 10^{-8} W/m^2.°K^4). La ecuación 4.3.9 (Ley de Stefan-Boltzmann) deja ver fácilmente que con bajos valores de temperatura la potencia emitida por radiación térmica puede ser baja; sin embargo, aumenta según la temperatura absoluta T (°K) elevada a la cuarta potencia.

Ocurre que $E_{W\,n(T)}$ es la potencia radiante del cuerpo negro, para un cuerpo **gris** se debe introducir un factor de ajuste denominado **emisividad espectral del cuerpo gris** $\varepsilon_{\text{Cuerpo gris}}$. Se define emisividad ε a la relación entre la potencia radiante de un objeto real ($E_{W\,\text{Cuerpo gris(T)}}$), y la correspondiente que emitiría un cuerpo negro de iguales características.

$$\varepsilon_{\text{Cuerpo gris}} = \frac{E_{W\,\text{Cuerpo gris (T)}}}{E_{W\,n\,(T)}} \qquad 4.3.10$$

Consecuentemente, la ecuación de Stefan-Boltzmann para un cuerpo gris queda definida por:

$$E_{W\text{Cuerpo gris (T)}} = \varepsilon_{\text{Cuerpo gris}} \cdot \delta \cdot T^4 \qquad 4.3.11$$

La **potencia radiante** por unidad de superficie ($E_{W\,\text{Cuerpo gris (T)}}$) para un cuerpo gris, es la misma que la de un cuerpo negro a la misma temperatura, sólo que reducida proporcionalmente en un valor $\varepsilon_{\text{Cuerpo gris}}$ para dicho cuerpo; ($0 < \varepsilon_{\text{cuerpo gris}} < 1$). En realidad, la emisividad depende del tipo de material, de la terminación superficial, de la longitud de onda (λ) y, en menor medida, de la temperatura.

La tabla 4.3.2 muestra algunos valores típicos de emisividad.

Superficie	Temperatura (°C)	Emisividad ε
Aluminio	150	0,09
Bronce comercial	25	0,06
Cobre comercial	25	0,07
Chapa de acero	900	0,55
Acero brillante	600	0,18
Oxido de hierro	900	0,88
Zinc comercial	260	0,05
Ladrillo Refractario	1000	0,75
Grafito	500	0,98
Vidrio liso	25	0,94
Vidrio pirex	300	0,86
Porcelana vidriada	25	0,92
Yeso	20	0,85
Pintura de aluminio	100	0,52
Cuarzo	20	0,91
Cemento	25	0,90
Asfalto	40	0,90
Goma	25	0,92
Madera lisa	25	0,85
Suelo seco	20	0,92
Suelo mojado	20	0,95
Hollín, carbón	20	0,95
Agua destilada	20	0,96
Agua nieve	10	0,85
Hielo	10	0,64
Piel humana	32	0,98
Papel	20	0,93

Tabla 4.3.2 Emisividad para diferentes superficies y temperaturas.

Si, por ejemplo, se calcula la potencia radiante E_w para distintas temperaturas y para una superficie cuya emisividad relativa es de 0,95, puede apreciarse la importancia significativa de la temperatura en el aumento de la energía radiada.

$\delta = 5{,}6697 \times 10^{-8}$ [W/(m².°K⁴)]		
ε = 0,95		
T (°C)	T (°K)	E_w (W/m²)
-173	100	5,4
-73	200	86,2
27	300	436,3
127	400	1.378,9
227	500	3.366,4
477	750	17.042,3
727	1000	5,39E+04
1227	1500	2,73E+05
1727	2000	8,62E+05
2727	3000	4,36E+06
3227	3500	8,08E+06

Tabla 4.3.3 Potencia radiante por unidad de superficie para distintas temperaturas.

Cabe destacar finalmente que la radiación infrarroja no se utiliza solamente para rutinas de diagnóstico; es muy importante su aplicación en el calentamiento de objetos. Dicho calentamiento es más homogéneo cuando la radiación es absorbida por todo el espesor del material. En general la radiación de onda corta (RI-C) penetra más profundamente y permite una distribución uniforme del calor. La radiación de onda media y larga (RI-M/L) propicia el calentamiento superficial provocando mayores gradientes de temperatura en el seno del material.

4.3.5 Cámaras para Termografía (principio de funcionamiento)

Mientras los pirómetros ópticos permiten mediciones puntuales, las cámaras de termografía o termocámaras analizan un área completa (imagen) y brindan la posibilidad de evaluar su heterogeneidad térmica. La medida de la energía recibida por un cuerpo en un intervalo $d\lambda$ y en torno de la longitud de onda λ, es la energía radiante o emitancia ya descripta previamente como E_w. La cantidad de radiación puede medirse empleando dispositivos termoeléctricos sensibles y, siendo que la temperatura es proporcional a la cantidad de energía radiada, resulta factible obtener el *mapa térmico* de muchas superficies con bastante exactitud[1].

Las cámaras de termografía no miden temperatura en forma directa, miden la radiación emitida por el objeto focalizado (E_w) en un rango de longitudes de onda predeterminado (subregión del infrarrojo) y luego, a través de los algoritmos vistos con anterioridad (ecuación 4.3.11 entre otras), el procesador electrónico construye la imagen térmica del objeto.

El proceso de captación de la radiación infrarroja, así como la conversión electrónica para lograr una imagen térmica, es bastante complejo. Escapa al alcance del presente trabajo describir completamente los tipos y funcionamiento de las termocámaras. Sólo mencionaremos que estos equipos poseen una lente, transparente a la radiación infrarroja, que focaliza el objeto y proyecta la radiación recibida sobre una matriz o arreglo de sensores llamados píxeles. Cada píxel *mira* la porción de la imagen correspondiente a su ubicación matricial. Esta tecnología se denomina FPA (Focal Plane Array). Las cámaras tipo FPA ofrecen la ventaja, frente a sus predecesoras de espejos y prismas rotantes, de no contar con partes móviles internas siendo que el grupo detector es una matriz fija compuesta por cientos de celdas independientes.Un sistema de barrido electrónico actualiza la medición con cierta frecuencia, dependiendo del tipo de cámara y de las características térmicas del objeto observado.

Cada sensor (píxel) mide la radiación y envía una señal eléctrica al circuito procesador quien codifica la información digitalmente para construir y mostrar la imagen en una escala de grises o colores[2]. Lo usual en un termograma es adjudicar colores claros a las temperaturas elevadas y colores más oscuros para las bajas temperaturas. El arreglo matricial y digital permite trazar perfiles de temperaturas, realizar interpolaciones o promedios para un área seleccionada y detectar puntos de máxima o mínima temperatura. Además, permite medir objetos en movimiento dada su alta velocidad de procesamiento. Las imágenes pueden almacenarse en dispositivos de memoria removibles y analizarse en software's específicos cuya calidad de post-procesamiento es fundamental para un diagnóstico adecuado del patrón térmico. Dentro de las características más sobresalientes de las actuales termocámaras encontramos que:

- Son fáciles de transportar y sencillas de operar (similar a una cámara de video).
- La lente, el visor y los filtros están totalmente integrados a la cámara.
- Poseen buena sensibilidad térmica; es decir, bajos valores de NETD (Noise Equivalent Temperature Difference).
- Proporcionan una precisión de ± 2 °C, aproximadamente.
- Cuentan con alarmas audibles y visibles para identificar límites de temperatura en puntos caliente o fríos predeterminados.
- Dependiendo del modelo y la prestación requerida, tienen amplia respuesta espectral, desde 1 a 14 µm aproximadamente.

---

1 La radiación recibida por la cámara infrarroja no proviene únicamente del objeto enfocado, también puede interferir la radiación reflejada por otras fuentes como el Sol o equipos circundantes.

2 Los detectores de infrarrojo pueden ser cuánticos (fotónicos) o microbolométricos, estos últimos son no refrigerados.

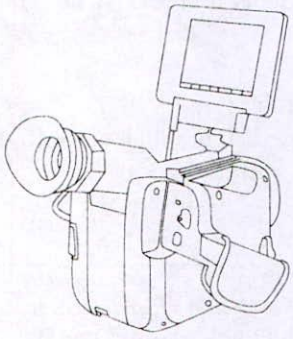


Figura 4.3.4
Dibujo ilustrativo de una cámara de termografía infrarroja de alta resolución.

Las cámaras requieren de ciertos parámetros antes de cada inspección, que deberán ser reingresados o ajustados si varía el objeto a medir o el contexto operativo. Es necesario definir, entre otros, la distancia al objeto y emisividad de su superficie y la temperatura y humedad relativa ambiente.

La emisividad varía considerablemente según el material y su terminación superficial. Si bien existen tablas para una gran cantidad de materiales como la mostrada en 4.3.2, es conveniente que el termógrafo ajuste el parámetro directamente en campo. Una alternativa práctica es colocar un adhesivo resistente a la temperatura y de emisividad conocida sobre la superficie a medir. Cuando, por conducción, el adhesivo alcanza la misma temperatura que el cuerpo, se mide su temperatura para dicha emisividad. Luego, se mide la temperatura sobre el cuerpo en un punto inmediato al adhesivo y se ajusta la emisividad del cuerpo hasta obtener la misma temperatura que la registrada con anterioridad. Se asegura, entonces, que la emisividad obtenida y calibrada para ese material es correcta, pudiéndose aplicar tal valor en toda la superficie restante del objeto.

Nota: Las cámaras termográficas no proporcionan medidas absolutas de temperatura porque existen fenómenos naturales difíciles de ajustar por calibración. De todas maneras, como técnica predictiva, es suficiente con mediciones relativas; siempre se compara la medición realizada en el sistema con su valor "bueno" o nominal de operación.

Ventanas Infrarrojas

En ocasiones sólo es posible tomar imágenes infrarrojas desde fuera de los recintos cerrados. Ya sea por seguridad o disponibilidad del equipo, la única posibilidad es tomar los termogramas a distancia y separados por un visor. Siendo que ciertos componentes como el vidrio común, policarbonato, cuarzo o plástico, son opacos a la radiación infrarroja superior a 2 μm (sólo dejan pasar las ondas correspondientes al visible), deben montarse *"ventanas infrarrojas"*. De lo contrario, se estaría midiendo únicamente la temperatura exterior del visor. Este es el caso de gabinetes cerrados y conductos de barras en media y alta tensión donde no es posible acceder. Las ventanas infrarrojas, como las del tipo H.VIR®, se fabrican de material especial de alta pureza permitiendo tanto el pasaje de la radiación infrarroja como la radiación visible.

Hay, además, ventanas exclusivas para onda corta muy efectivas para longitudes de onda comprendidas entre 2 y 5,5 μm. Los cristales utilizados para inspeccionar solamente en onda larga son transparentes al infrarrojo lejano (7 a 12 μm). Estos elementos especiales se vuelven imprescindibles para ciertos equipos industriales que, de lo contrario, deberían retirarse de servicio para ser inspeccionados.

4.3.6 Ventajas y Desventajas de la Termografía Infrarroja

Las modernas cámaras procesan imágenes y efectúan mediciones digitales infrarrojas en tiempo real, con capacidad para medir temperaturas de entre -30 °C y más de 1.300 °C.

Ventajas	Desventajas
No es necesario retirar de servicio los equipos; el análisis se realiza a una distancia de seguridad reduciendo significativamente los riesgos de accidente.	No permite realizar mediciones de gran exactitud. Para ello es necesario conocer los parámetros físicos, geométricos y ópticos del contexto.
Permite mediciones on-line porque los sensores infrarrojos presentan un tiempo de respuesta pequeño a la radiación térmica (microsegundos)	Si la falla interna del elemento no se manifiesta externamente por aumento de temperatura, será imposible detectarlo. Sólo se miden temperaturas superficiales.
Ideal para situaciones de extrema temperatura y objetos alejados o en movimiento.	Los reflejos de los rayos solares pueden enmascarar o confundir defectos.
Permite identificar la presencia de elementos defectuosos en forma masiva, a diferencia de la pirometría que sólo mide la temperatura puntual e instantánea.	
Se reducen significativamente los cortes no programados. (Mantenimiento de Emergencia).	

Tabla 4.3.4
Ventajas y Desventajas de la Termografía Infrarroja.

4.3.7 Aplicaciones y Diagnóstico

En esta sección se abordan los criterios de diagnóstico empleados para la detección de fallas sintomáticas en diferentes aplicaciones industriales como ser:

√ Sistemas eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos.
√ Materiales Refractarios, de Proceso o Aislantes.
√ Procesos Industriales, Sistemas de Transporte y Sistemas de Vapor.
√ Infraestructuras, construcciones y edificios.

4.3.7.1 Sistemas Eléctricos

La ventaja marginal de aplicar termografía infrarroja para detectar fallas en sistemas eléctricos, se logra también en seguridad. Las averías de algunos elementos pueden tener consecuencias catastróficas hiriendo o afectando gravemente a personas. Tanto para áreas de generación, transmisión, distribución o consumo, se utiliza básicamente en:

√ Componentes e instalaciones de maniobra para baja, media y alta tensión.
√ Subestaciones y líneas de transporte de baja, media o alta tensión.
√ Paneles interruptores, seccionadores, llaves interruptoras, conexiones y fusibles.
√ Cables, empalmes y tableros. Equipamiento para la distribución eléctrica en general.
√ Transformadores de potencia, barras de transporte, centro de control de motores (CCM).
√ Máquinas eléctricas como generadores, motores eléctricos o variadores.
√ Borneras de motores y generadores, paneles de comunicación e instrumentación.
√ Detección de pérdidas por inducción magnética, etc.

Cuando una corriente eléctrica circula por un conductor genera calor por efecto Joule[1]. La cantidad de calor (Q) por unidad de tiempo es proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad de corriente (I). La ecuación 4.3.12 puede expresarse en calorías incorporando la constante K que equivale a 0,2389, (1 Joule = 0,2389 Calorías).

$$Q \approx k \,.\, I^2 \,.\, R \qquad 4.3.12$$

Esto significa que la cantidad de calor disipada dependerá tanto del aumento de corriente como de resistencia.

Por ejemplo, un sistema trifásico deberá tener una corriente uniforme en cada fase mostrando un patrón de temperatura homogéneo. La condición de carga desbalanceada mostrará un exceso de calentamiento a lo largo de todo el conductor de la fase sobrecargada.

Ejemplo 4.3.1

Cuando una fase se sobrecarga, la imagen térmica mostrará algo similar a lo observado en la figura 4.3.5.

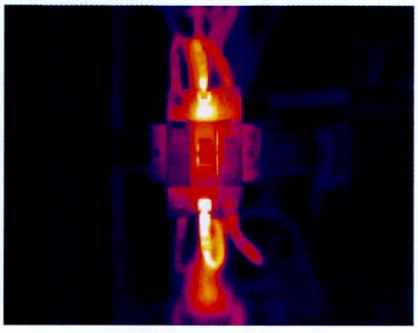


Figura 4.3.5
Interruptor con posible sobrecarga en una fase.

La falla sintomática proviene de un exceso de corriente en la fase más caliente; obsérvese una mayor temperatura a lo largo de todo el conductor central y a ambos lados del interruptor.

Ejemplo 4.3.2

En otras ocasiones el incremento de temperatura se debe a un aumento en la resistencia. Los valores normales de resistencia varían si existen contactos flojos o excesivamente ajustados, envejecimiento, desgaste de material, suciedad, tornillos sueltos, oxidación, componentes dañados o fatiga.

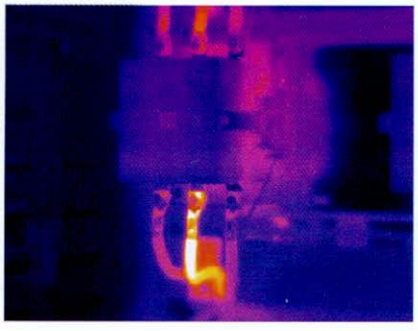
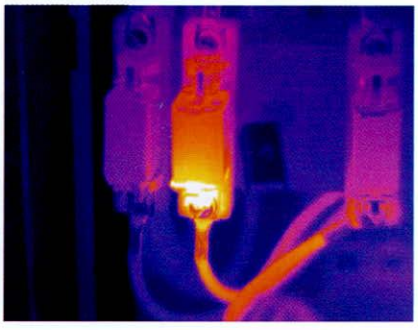


Figura 4.3.6
Aumento de resistencia por contactos deficientes.



El aumento de temperatura se manifiesta en la conexión, disipándose el calor gradualmente. Aparece un punto aislado y caliente.

---

1 James Prescott Joule (1818-1869) nació en Salford, Inglaterra, y fue el descubridor de dos leyes físicas que llevan su nombre.

Ejemplo 4.3.3

La corriente alterna induce un flujo de corriente y un flujo magnético en objetos metálicos como conductos, paneles de distribución y aceros estructurales. Este fenómeno es más frecuente en sitios cercanos a equipos de alto voltaje como transmisores de microondas y sistemas de calentamiento por inducción.

El campo induce corrientes parásitas *(eddy current)* que generan el calentamiento localizado cuando la disipación por conducción y/o convección es insuficiente.

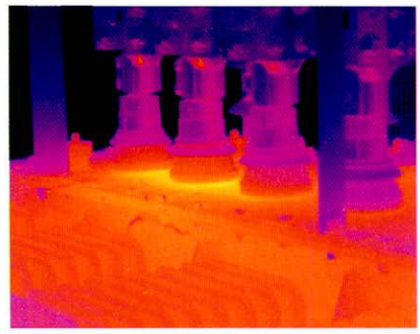


Figura 4.3.7 Calentamiento localizado por corrientes parásitas sobre una estructura de un transformador.

Ejemplo 4.3.4

Los sistemas de distribución eléctrica tienen una frecuencia de 50 o 60 Hz, dependiendo del lugar. Existen armónicas, múltiplos de esa frecuencia, que se suman causando severas sobretensiones, sobrecargas y, por tanto, altas temperaturas. La elevada temperatura ha producido incluso la fusión de cables, conexiones, superficies de contacto, etc. Las armónicas afectan también a transformadores, motores, generadores, paneles de control e interruptores.

Ejemplo 4.3.5

En líneas de distribución eléctrica y subestaciones, los especialistas de predictivo recorren el trayecto para identificar elementos que necesiten inmediata reparación o sustitución, o que requieran una acción de investigación técnica (ADF[1]).

Figura 4.3.8 Calentamiento de una aislación en líneas de distribución eléctrica.

Ejemplo 4.3.6

Un motor eléctrico puede sufrir fallos en el estator, rotor, entrehierro o aislación. Dichas causas pueden ser inherentes a éste u originadas en el circuito de potencia en el que se encuentra instalado o en la calidad de la energía absorbida. Anomalías en conductores, bornes, interruptores, fusibles, protecciones o bien un exceso de armónicas de línea, pueden provocar serios daños en las máquinas eléctricas.

Los tipos de aislación para devanado más utilizadas en motores eléctricos se ilustran en la tabla 4.3.5, su elección depende de la máxima temperatura de trabajo esperada. Superando estos valores, la aislación puede dañarse seriamente.

Clase de Aislación	Máxima temperatura de Operación
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C

Tabla 4.3.5 Máxima temperatura de operación en un motor eléctrico según el tipo de aislación.

1 Análisis de Fallo.

Para un buen diagnóstico, es preciso contar con la clase de aislación que posee el motor. Así, se sabrá cuán lejos se encuentra el equipo de entrar en falla por esta causa. Una norma de buen uso, recomendada por especialistas, es considerar que la aislación se encuentra a 20 °C por encima de la temperatura de la carcasa que, justamente, es lo medido termográficamente (recordar que se toma únicamente la radiación RI emitida por la superficie).

Figura 4.3.9
Falla sintomática en un motor eléctrico por posible deterioro en la aislación o refrigeración insuficiente.

No obstante, para obtener un diagnóstico certero en este tipo de máquinas y, además, para revelar la verdadera causa raíz, es aconsejable combinar la termografía con otras técnicas predictivas[1]. La termografía RI pone de manifiesto la falla sintomática, mientras que con ayuda de otras técnicas condicionales puede determinarse la causa raíz o el modo de falla. Siempre es conveniente confeccionar diagramas de tendencia que faciliten seguir exhaustivamente la variable o parámetro característico (relación **punto - temperatura**), aunque aún no se haya alcanzado la temperatura límite de alerta o alarma.

Ejemplo 4.3.7
Los transformadores son equipos prioritarios y la termografía puede detectar puntos "calientes" (o "fríos") que podrían indicar la existencia de una falla sintomática.

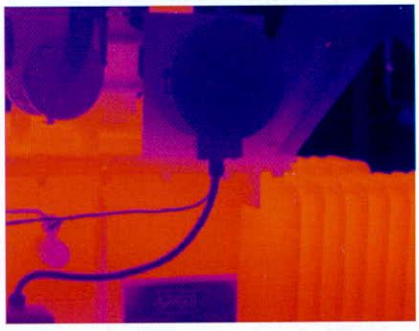


Figura 4.3.10
Imagen térmica de una parte de un transformador de potencia.

4.3.7.2 Sistemas Mecánicos

En los sistemas mecánicos las termofotografías resultan de utilidad en:

- √ Reductores, sistemas de transmisión y transportadores.
- √ Rodamientos, poleas, acoplamientos, engranajes, correas.
- √ Motores eléctricos, bombas, ventiladores, compresores y soplantes.
- √ Maquinas rotativas, motores de combustión interna y turbomáquinas.

El calor excesivo puede originarse por fricción, deterioro en los sistemas de refrigeración, desalineación, lubricación deficiente, pérdidas de material o atascamiento. En los mecanismos, el calor se produce mayormente por elementos ocultos a simple vista.

Ejemplo 4.3.8
Cuando la falla incipiente en un rodamiento adquiere un estado elevado de deterioro (cercano a la falla funcional), el resultado es un sobrecalentamiento en la zona circundante, figura 4.3.11.

---

1 Ver punto 4.5, Otras Técnicas Condicionales.

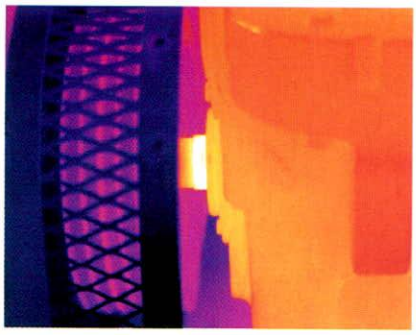
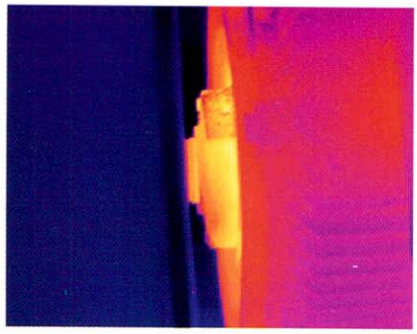


Figura 4.3.11
Excesivo calentamiento por falla sintomática en rodamientos.



Ejemplo 4.3.9
En bombas y tuberías puede identificarse incrustación o calentamiento localizado por fricción.

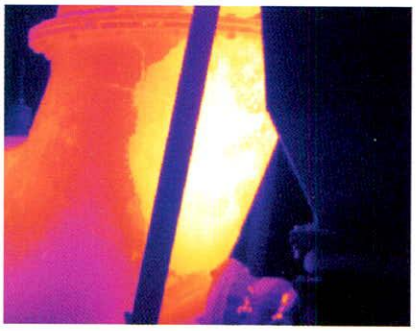
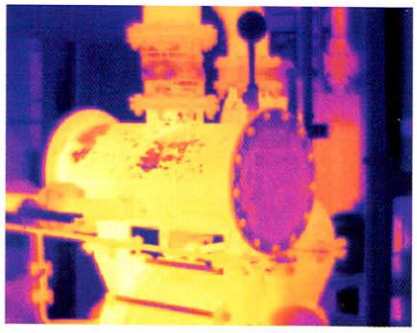


Figura 4.3.12
Termofotografía en bomba de vacío y tuberías.



Ejemplo 4.3.10
En circuitos de cañerías pueden observarse altos valores de temperatura en válvulas, tubos, radiadores, enfriadores o inyectores.

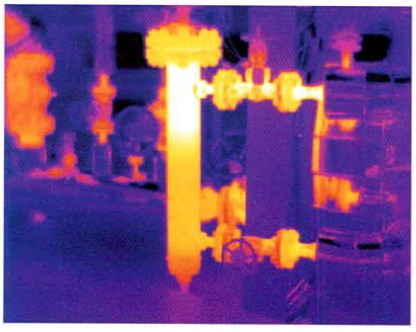
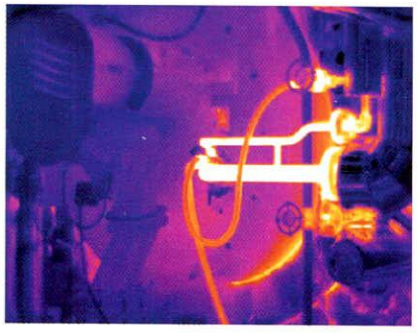


Figura 4.3.13
Espectro de temperatura en sistemas de alimentación.



Ejemplo 4.3.11
Lubricación inadecuada, problemas de desalineación o desgaste avanzado de elementos, son situaciones que pueden aumentar la fricción, generar calor e incrementar, por consiguiente, la temperatura.

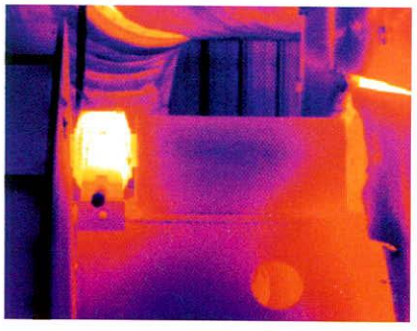


Figura 4.3.14
Falla sintomática en un rodamiento de un motor eléctrico.

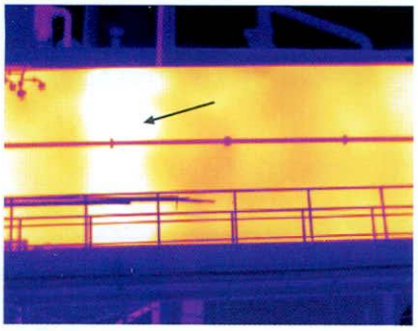
4.3.7.3 Materiales Refractarios – Aislantes

La inspección en recubrimientos refractarios o aislaciones se basa en el hecho de que si existe una temperatura homogénea dentro de un recipiente, la temperatura exterior de la superficie es función directa de la transmisión del calor por conducción a través de la aislación y la pared del recipiente. Tanto la humedad que pudiera haber en la aislación como su desgaste desigual, son fácilmente localizables. Suelen aparecer en el espectro térmico como *manchas* debido a la transferencia de calor no uniforme desde el interior del recipiente hacia la superficie.

El campo de aplicación es muy variado: hornos, secadores, estufas industriales, calderas, máquinas de colada, tanques de almacenamiento y tuberías aisladas, etc.

Ejemplo 4.3.12

En la figura siguiente pueden observarse fallas por deterioro acumulado (espesor disminuido) en los ladrillos refractarios de un horno giratorio.



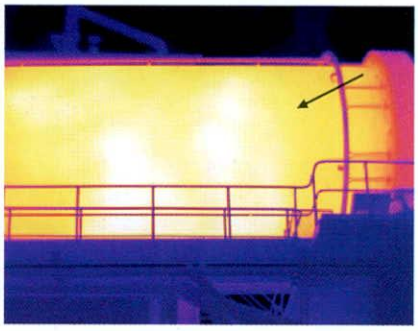


Figura 4.3.15 "Manchas térmicas" sobre el espectro de temperaturas de un horno giratorio.

Ejemplo 4.3.13

Nótese la acumulación excesiva de producto en el interior de un horno (adosado al refractario), alterándose la transferencia de calor al exterior al formarse un mayor espesor con distinto coeficiente de transmisión. La adhesión de anillos o bloques de material sobre la superficie interior, provoca mayores esfuerzos en los mecanismos de accionamiento del equipo y una distribución heterogénea de material (figura 4.3.16).

Figura 4.3.16 Anillos de material depositado en el interior de un horno rotativo.

Las figuras siguientes muestran problemas de aislación térmica en recipientes sometidos a presión y temperatura.

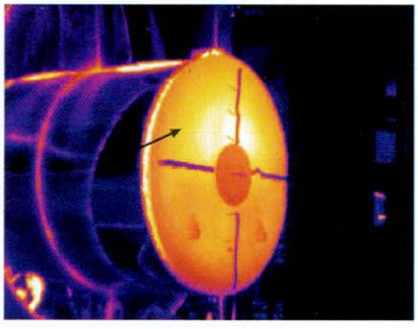


Figura 4.3.17 Falta de aislación en la entrada de hombre de un horno industrial y daño incipiente en el material refractario de una caldera.

4.3.7.4 Procesos Industriales – Sistemas de Vapor

El uso de la termografía en el área de Productos y Procesos prácticamente no encuentra límites; se mencionan a continuación algunas instalaciones de potencial aplicación.

- √ Intercambiadores de calor.
- √ Torres de enfriamiento.
- √ Soldaduras y tratamientos térmicos.
- √ Válvulas para líquidos o vapor, trampas y líneas de vapor.
- √ Tanques de almacenamiento y tuberías subterráneas.
- √ Instalaciones frigoríficas, reactores y condensadores.
- √ Maquinaria de proceso, etc.

Ejemplo 4.3.14
En muchos procesos industriales, la temperatura es una variable de seguimiento o un indicador de condición anormal en el flujo del producto.

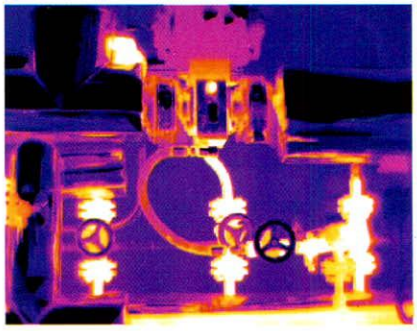
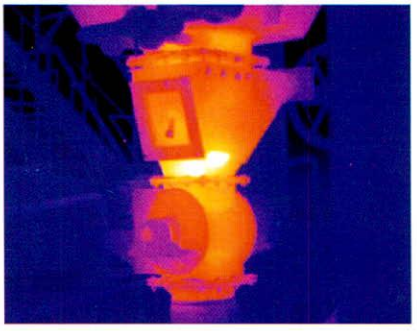


Figura 4.3.18 Distribución heterogénea de producto en una cañería de proceso.



Ejemplo 4.3.15
El vapor es utilizado para transportar energía. Los especialistas en predictivo aprovechan el aumento de temperatura para identificar pérdidas, y la disminución para detectar fallas sintomáticas por obstrucción en conductores, reguladores, válvulas o consumidores de vapor.

Por su parte, las válvulas de seguridad tienen como función principal reducir rápidamente la presión en el interior de recipientes cuando la misma sobrepasa cierto límite prefijado. Si por algún motivo la válvula no cierra correctamente, libera gases al medio incrementando o disminuyendo (según sea la condición operativa) la temperatura circundante.

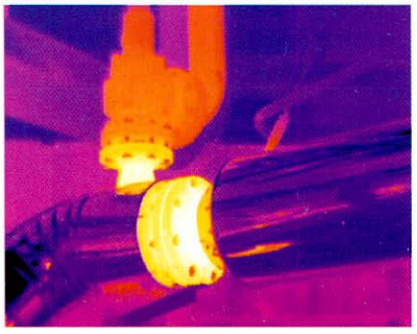


Figura 4.3.19 Válvula de seguridad de una caldera en operación normal.

Ejemplo 4.3.16
El gradiente de temperatura sobre una purga de vapor debe ser significativo. Las purgas tienen como función permitir la salida de condensado, impidiendo la salida de vapor. El estado de condensado se alcanza cuando el vapor cede energía al medio en forma de calor. Si no existe un gradiente de calor suficiente entre la entrada y la salida de la purga, puede existir un fallo. Hoy en día se está reemplazando esta metodología por técnicas de ultrasonido.

Figura 4.3.20 Trampa de vapor en funcionamiento correcto.

Ejemplo 4.3.17
En tanques de almacenamiento o transferencia de productos líquidos, puede medirse el nivel a partir de observar la diferencia de temperatura establecida entre la superficie cubierta por el líquido y aquella que no lo está. La determinación termográfica de niveles, puede usarse para ajustar instrumentos normales de operación de control de nivel.

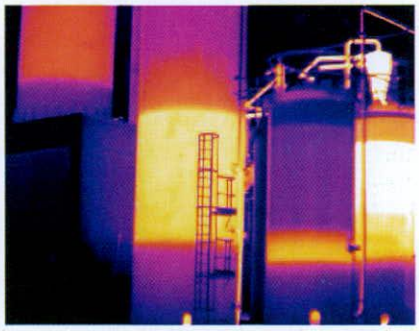


Figura 4.3.21 Detección y verificación de niveles en tanques de producto químico.

Ejemplo 4.3.18
Los recubrimientos internos o refractarios en chimeneas, pueden sufrir deterioro por la acción combinada de temperatura y agentes químicos. La termográfica infrarroja puede identificar con facilidad el estado de condición básica de dichos elementos.

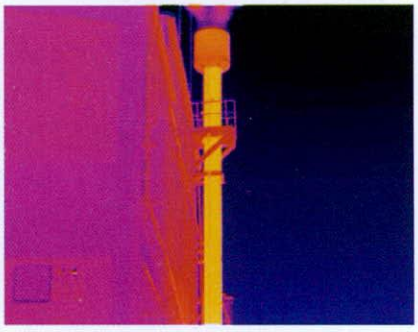


Figura 4.3.22 Estado satisfactorio de un ducto para la salida de gases.

4.3.7.5 Infraestructura – Construcciones – Edificios
El aporte de la termografía para el control de infraestructuras o edificios, es muy importante. Se utiliza con frecuencia para descubrir pérdidas de calor y ahorrar energía. Por ejemplo:

√ Condición y eficiencia de aislaciones térmicas en edificios o viviendas.
√ Evaluación y verificación de humedad.
√ Verificación de heterogeneidad en materiales como concreto o adhesivos.
√ Determinación de pérdidas o ingreso de aire en edificios.
√ Localización de fisuras en paredes y techos.
√ Ubicación de pérdidas en cañerías empotradas o enterradas.
√ Evaluación y estudio de puentes, carreteras y pavimentos.
√ Perdidas en sistemas de calefacción o refrigeración.

Ejemplo 4.3.19
En techos de edificios y mamposterías, y a través de la detección de puntos fríos o calientes, puede identificarse la presencia de discontinuidades, daños o averías.

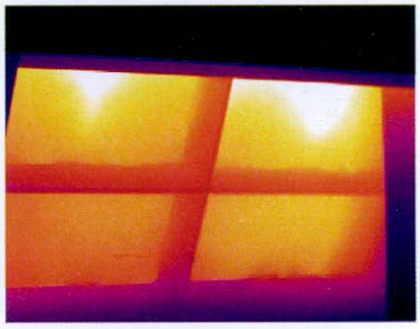


Figura 4.3.23 Identificación de pérdidas de calor en mampostería.

Ejemplo 4.3.20
También es factible identificar roturas en aislaciones o detectar filtración y exfoliación.

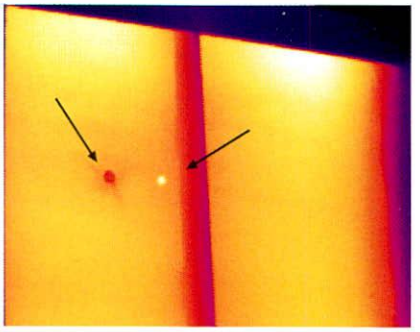


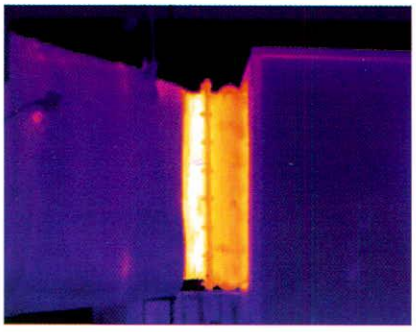
Figura 4.3.24
Puntos frío y caliente sobre una aislación térmica.

4.3.7.6 Otras aplicaciones

Resultaría interminable confeccionar una lista con todas las aplicaciones que permite la termografía. Simplemente se enumeran algunas otras de importancia.

√ Cavidades e inclusiones en sólidos.
√ Detección de corrosión, mezclas y aleaciones.
√ Inspección de la integridad estructural en vehículos.
√ Falta de adhesión, espesor, porosidad u oclusión de aire en materiales compuestos.
√ Evaluación de uniones y empalmes metálicos.
√ Acumulación de sarro o incrustaciones en tuberías.
√ Grado de adherencia en pinturas o recubrimientos.

Ejemplo 4.3.21
A la izquierda de la figura siguiente se observa alta temperatura en una junta de expansión; la figura de la derecha hace lo propio en una junta de aislación de un horno industrial.



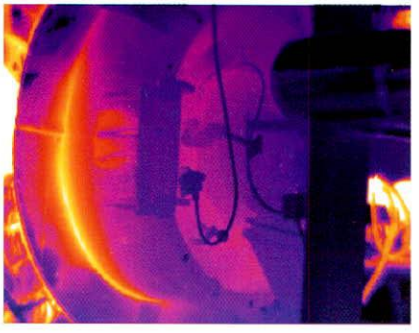
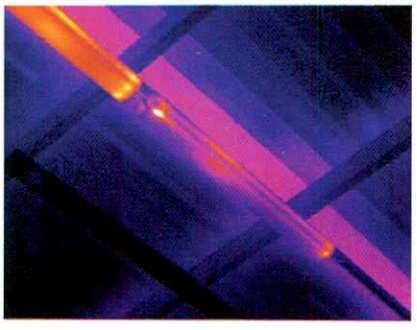


Figura 4.3.25
Calentamiento en una junta de expansión y en la aislación de un horno industrial.

Ejemplo 4.3.22



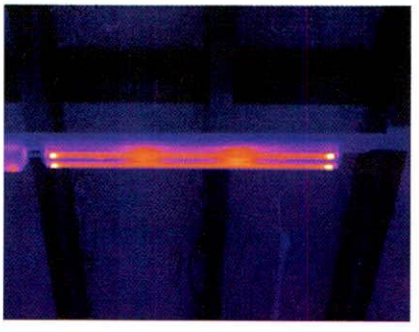


Figura 4.3.26
Calentamientos localizados en artefactos de iluminación.

4.3.8 Recomendaciones para programar una Ruta de Termografía

Detectar un punto caliente (o frío) es sólo el comienzo del análisis termográfico. No alcanza con individualizar los picos de calor; hoy en día resulta vital diagnosticar la falla determinando la causa raíz y recomendar acciones para corregir el síntoma de manera definitiva. El especialista termógrafo debe cubrir tales requerimientos interpretando, acertadamente, los patrones térmicos. A continuación se enumeran los principales pasos para diseñar un plan termográfico de Planta.

√ **Determinar y listar los puntos de inspección**, como así también la secuencia de cada uno dentro de la ruta. Se recomienda hacer uso de herramientas de decisión como RCM para no incluir mediciones innecesarias. Evitar el monitoreo masivo de puntos, ya que no todos los elementos con temperatura pueden corresponder con una falla sintomática. Es preferible comenzar con poca cantidad (aquellos cuya consecuencia representa mayor severidad) y, una vez dominada la técnica, aumentar el alcance.

√ **Parametrizar cada punto seleccionado**, reuniendo la mayor cantidad de información y definiendo el nivel térmico nominal. Definir los valores límites de alerta y alarma y, si es necesario, confeccionar diagramas de tendencias. La fuente de información más valiosa, es la experiencia adquirida por el personal de operación y mantenimiento; sin embargo, pueden tenerse en cuenta las recomendaciones de los fabricantes, la experiencia recavada en equipos similares o el historial de fallas (si existiese).
La parametrización de la Ruta finaliza estableciendo, para cada punto, la emisividad y la distancia focal; es decir, tomar las imágenes siempre para el mismo material y desde la misma ubicación.

√ **Establecer la frecuencia para la Ruta de Inspección**. Definido el nivel nominal de temperatura para cada punto, debe determinarse la frecuencia de inspección. Primero, agrupar los puntos de mayor similitud de frecuencia y luego, ajustar cada uno al valor medio de frecuencia referido al resto del conjunto. Prever en cada caso que el ajuste no afecte la confiabilidad del monitoreo ni el intervalo Δt_{SF}.

√ **Inicializar la ruta** generando la Orden de Trabajo (OT) correspondiente. La información se almacena digitalmente y se utiliza para evaluar punto a punto la Ruta Condicional. El analista se encarga de cotejar los valores medidos con los nominales almacenados. El trabajo de identificación y diagnóstico comienza en este momento.
Aquellos puntos que se encuentren fuera del rango normal, deben investigarse; aunque si la severidad lo impone, se debe generar de inmediato una OT restaurativa como acción paliativa o contensiva. Con tal acción, es posible que sólo se evite la falla funcional del elemento pero no su reiteración. Paralelamente, el analista debe investigar la verdadera causa raíz y sugerir la acción preventiva más recomendada para evitar su repetición. El informe predictivo debe referenciar la OT, mencionando la acción contingente adoptada.
Si el límite de alerta no es superado pero la temperatura se incrementa respecto a mediciones anteriores en más de 15 ó 20 °C, cabe una acción de investigación. Recordar que si los factores que conforman el contexto operativo no sufren alteración, las variables de inspección tampoco deberían cambiar.
Las tareas de diagnóstico pueden requerir la toma de nuevas imágenes desde distintas ubicaciones para ratificar la medición original.

√ **Seguir de cerca las reparaciones** es muy importante porque se minimiza la repetición de fallas, y si aparecen, permite trabajar junto a mantenimiento para encontrar una solución definitiva (eliminar la causa raíz por medio de ADF's).

√ **Documentar los ahorros** por el hecho de aplicar termografía infrarroja.

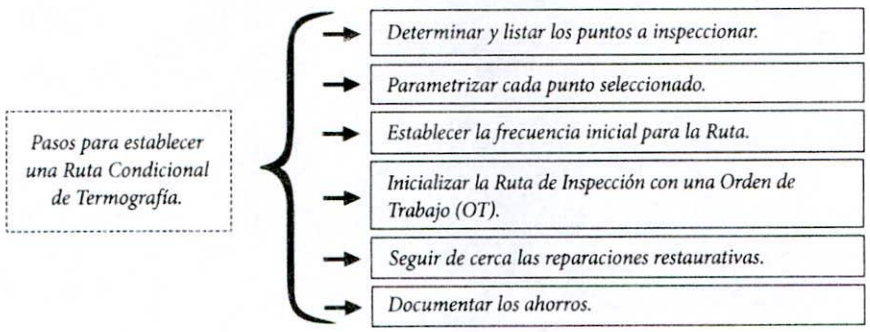


Figura 4.3.27 Pasos recomendados para implementar una Ruta Condicional Termográfica.

4.4 Tribología y Análisis de Aceites

Habíamos ya enfatizado en el capítulo referido al Mantenimiento Predictivo y Proactivo que una de las herramientas más eficaces para identificar fallas sintomáticas prematuras, es el análisis de aceites usados. Un programa de monitoreo bien establecido sobre instalaciones prioritarias, no sólo evita averías mayores en los activos, también mejora las condiciones de lubricación, genera ahorros de energía, mano de obra y repuestos, disminuye el consumo de combustible, aprovecha la vida útil de los mecanismos y aumenta la disponibilidad de Planta, etc.

La tribología es una ciencia integradora que nace en Inglaterra a principios de la década del 60'. Del griego *tribos* (desgaste) y *logía* (estudio), se ocupa de controlar y minimizar el desgaste por fricción entre elementos de máquinas. Muchas de las técnicas utilizadas en tribología son netamente proactivas porque permiten predecir **fallas sintomáticas reversibles**.

Mientras el mantenimiento predictivo procura identificar fallas sintomáticas y anticiparse a la avería catastrófica, el mantenimiento proactivo busca las causas raíz de falla que podrían provocar el deterioro, antes de manifestarse el estado incipiente de falla. En ocasiones esto permite tomar acciones para desviar tendencias que, de lo contrario, derivarían en una falla sintomática irreversible. Se trata de una disciplina **investigativa** que hace uso de múltiples herramientas de diagnóstico.

Implementar un plan de Mantenimiento Proactivo requiere comprender el mecanismo por medio del cual las causas raíz de falla (fallas sintomáticas reversibles en algunos casos) pasan del estado **potencial** al estado **real**. Generalmente se cae en la equivocación de confundir el síntoma de una falla con su causa raíz.

Altos valores de desbalanceo en un rotor pueden provocar un daño irreparable en los cojinetes antifricción sobre los que se apoya. La identificación de estos daños corre por cuenta del mantenimiento predictivo. Sin embargo, cuando se consigue mantener al rotor dentro de valores nominales de desbalanceo (sólo el residual), seguramente se retardará el nacimiento y progreso de falla en los rodamientos. Justamente el control periódico de balanceo y alineación en rotores, constituye una práctica de mantenimiento proactivo.

Algo similar sucede, por ejemplo, en un mecanismo de engranajes. Los daños superficiales sobre las zonas de contacto deslizante (línea de paso) de los dientes podrán identificarse con un espectro de velocidad o aceleración. Sin embargo, si se mantienen ciertas condiciones tribológicas del reductor bajo control como viscosidad, temperatura, grado de oxidación, nivel de contaminación, etc., podría asegurarse que, al menos por motivos de lubricación, el equipo responderá sostenidamente en el tiempo con altos niveles de confiabilidad.

Mantenimiento Predictivo	Mantenimiento Proactivo
Falla sintomática irreversible	**Falla sintomática, en ocasiones, reversible**
Daño (fatiga) en la pista interior de un rodamiento sobre el que se monta el eje de un rotor. Causa probable: altos niveles de desbalanceo.	Control periódico de desbalanceo residual y alineación. *(Se reducen las posibilidades de fallos sintomáticos irreversibles en otros componentes como rodamientos).*
Desgaste superficial excesivo en la línea de paso (zona de presión o rodadura) de los dientes de un tren de engranajes. Causa probable: Funcionamiento permanente con bajos niveles de limpieza en el aceite.	Análisis físico - químico del aceite del reductor y análisis de contaminantes. *(Se reducen las posibilidades de fallos sintomáticos irreversibles sobre los engranajes).*

Tabla 4.4.1
Falla sintomática de acuerdo a lo prematuro de la detección.

4.4.1 Alcance de los Análisis de Aceite

El campo de aplicación del análisis de aceite es casi ilimitado. Todo mecanismo que utilice para su funcionamiento un lubricante, puede ser objeto de controles periódicos de seguimiento. Cojinetes de rodamiento, turbinas de vapor y gas, bombas, reductores, sistemas hidráulicos, compresores de aire y frigoríficos, motores de combustión, transformadores de distribución eléctrica, trenes de engranajes, etc. son máquinas sobre las cuales puede efectuarse un estudio del lubricante con resultados satisfactorios.

No siempre es necesario evaluar el costo - beneficio de realizar tales prácticas. Por ejemplo, es muy probable que resulte conveniente efectuar análisis de aceite periódicos en un reductor de velocidad con alta solicitación de servicio. De la misma forma sucede con ciertos transformadores de potencia o con compresores de uso frigoríficos. Por el contrario, si la consecuencia de la falla no es grave, podrá ser más rentable el reemplazo del lubricante en forma preventiva. No obstante, y como se verá posteriormente, la finalidad de un análisis proactivo de aceite no es determinar únicamente la condición físico - química del fluido; también es posible (y necesario) saber el estado tribológico de la máquina, las causas de su desgaste, el ingreso de contaminantes, el nivel y origen de las impurezas, la calidad de combustión, etc. Un cambio periódico del lubricante no siempre garantiza el estado adecuado de lubricación en **todos** los mecanismos (la causa raíz puede no eliminarse).

Aunque la renovación del lubricante se realice con la frecuencia indicada por el fabricante, ciertos factores de contexto operativo podrán afectar la tribología del sistema. Bajo estas circunstancias hasta puede ser necesario cambiar la estrategia de lubricación. Algunos laboratorios de prestigio también ofrecen técnicas que ayudan a determinar, con bastante precisión, las causas que produjeron una avería (Análisis de Falla ó ADF). Se deja para el lector profundizar las distintas técnicas de investigación para determinar las causas que produjeron la salida de servicio de una máquina. El **análisis espectrométrico, análisis de densidad ferrosa** y la **ferrografía analítica**, son las herramientas más usadas para estudiar las partículas de desgaste en estos casos. Sin embargo, los mayores beneficios se logran en la etapa de monitoreo proactivo, previa a la manifestación del síntoma irreversible.

4.4.2 Objetivos y Fallas Sintomáticas

Muchos de los objetivos que persigue un análisis de aceite usado ya fueron mencionados. Se pueden resumir igualmente a través del siguiente cuadro.

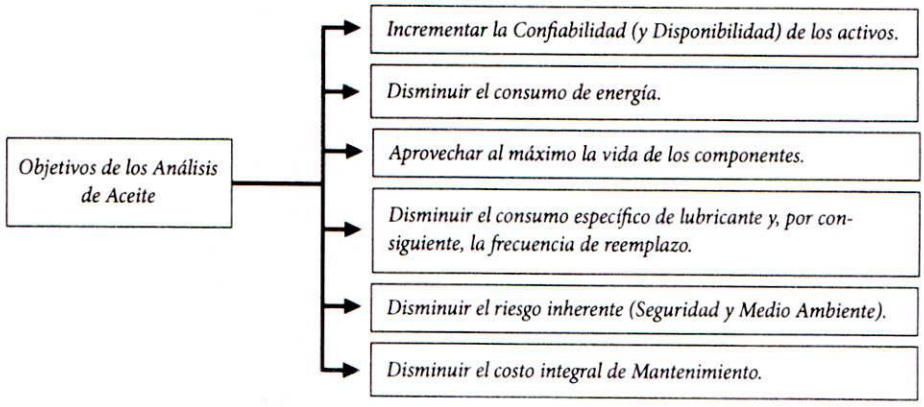


Figura 4.4.1 Principales objetivos de un análisis de aceite usado.

El Laboratorio Dr. Lantos[1] identifica tres categorías en que debe ser entendido un análisis de aceite de calidad. La primera categoría monitorea el estado físico - químico del fluido (acción proactiva para los mecanismos y en ocasiones para el lubricante). Luego, un estudio de contaminantes (acción proactiva para los mecanismos y en ocasiones para el lubricante) y, finalmente, un estudio de las partículas de desgaste (acción predictiva para los mecanismos).

Los lubricantes son los componentes industriales que más fuertemente se ven influenciados por el contexto operativo; es decir, condiciones ambientales y tribológicas del sistema. Algunas de las fallas sintomáticas que pueden detectarse se relacionan con las siguientes áreas.

√ Combustible utilizado y su impacto en el lubricante o en el sistema.

√ Grado y fuente de contaminación por líquidos y sólidos (agua, refrigerante, tierras, etc.).

√ Partículas abrasivas metálicas. Fuente y peligrosidad.

√ Consecuencias de la temperatura de operación.

√ Problemas de desalineación, desbalanceo, cavitación y sobrecarga.

√ Desgaste por adhesión y fatiga.

√ Efectividad y agotamiento de aditivos.

√ Eficiencia del sistemas de filtrado.

√ Contaminación con productos químicos, inherentes o externos al tribosistema.

√ Selección equivocada del lubricante.

√ Falla sintomática en cojinetes, rodamientos, engranajes y mecanismos en general.

---

1 Laboratorio con sede en Argentina de reconocida trayectoria y fundado en 1960 por el químico austriaco Dr. Federico Lantos. Su actual director, el Ingeniero Esteban Lantos, es considerado en el ámbito internacional como uno de los tribólogos más destacados. www.lantos.com.ar.

4.4.3 Introducción a la Lubricación

La lubricación es una práctica desarrollada originalmente de forma empírica y, por cierto, muy antigua (Egipto 4.000 a.c.). Pero fue recién a principios del siglo XIX que el rozamiento comenzó a ser controlado y entendido científicamente de manera integrada.

La propiedad fundamental de un lubricante es su viscosidad (en grasas la consistencia[1]), y la función primaria es mantener separadas las superficies en movimiento; vale decir, controlar la fricción disminuyendo el desgaste producido por rodadura, rotación o deslizamiento relativo. Cuando un fluido se pone en movimiento surgen fuerzas de rozamiento entre sus capas que reemplazan el rozamiento entre los cuerpos. La resistencia interna a fluir que ofrece el aceite, es la viscosidad dinámica o absoluta (μ) medida en Centipoise [cP]. Por su parte, y por razones de simplificación instrumental, se mide la viscosidad cinemática (ν). Las unidades de medida más utilizadas para la viscosidad cinemática son el Centistoke [cSt] y el Segundo Saybolt Universal [SSU]. Es factible convertir estas unidades de manera aproximada por medio de la siguiente expresión:

$$SSU = 4{,}6 \times cSt \qquad (4.4.1)$$

En la figura 4.4.2 puede notarse que la fricción es una fuerza tangencial cuya dirección coincide con la del movimiento pero su sentido es contrario (se opone al movimiento). Un tribosistema es un proceso en el que interactúan cuatro elementos: dos sólidos con velocidad relativa entre ellos (elemento 1 y 2), un compuesto fluido interpuesto (3) y el medio ambiente (4).

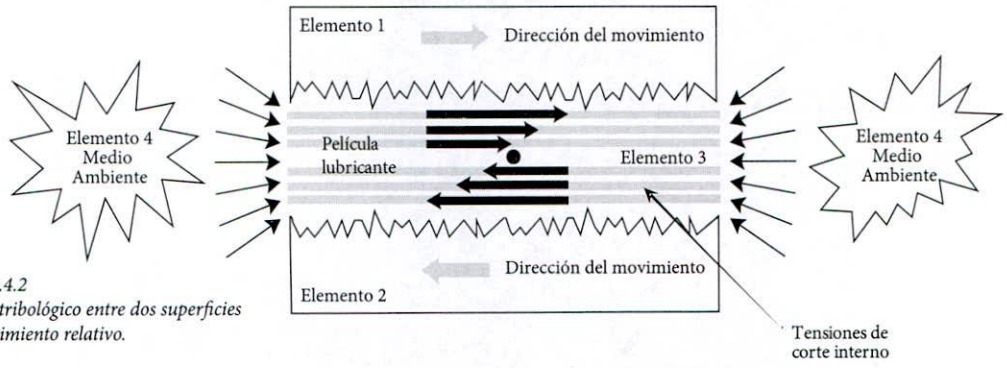


Figura 4.4.2
Sistema tribológico entre dos superficies con movimiento relativo.

La fuerza de fricción depende de la carga aplicada[2] y del estado (rugosidad) de las superficies. También depende del área **real de contacto** entre los dos cuerpos en movimiento. Se entiende por área real de contacto (microscópica) aquella que efectivamente comparten ambas superficies a través de sus puntos de contacto. El área **aparente de contacto** es la geométrica o también llamada de enfrentamiento (macroscópica); vale decir, aquella superficie que un observador a simple vista cree que comparten los dos sólidos. La película lubricante (de distinto espesor de acuerdo al contexto) está sometida a tensiones de corte interno como puede observarse en la figura 4.4.2 y debe tener el espesor suficiente para separar completamente las superficies.

---

1 Ver sección 4.4.10 "Grasas Lubricantes".

2 Charles Auguste Coulomb (1736-1806) nació en Angouleme, Francia. Observó que la fuerza de fricción que hay que vencer para mover un cuerpo respecto a otro es proporcional a la carga normal aplicada, pero independiente del área aparente de contacto. La relación entre dichas fuerzas se denomina coeficiente de fricción f.

Durante un proceso de lubricación se presentan algunas de las siguientes condiciones:

√ **Lubricación de capa fina (CF) ó Límite.**
Ocurre cuando la película de aceite es muy delgada (< 5 micrones). Las irregularidades son mayores que el espesor de la película y el área real de contacto es excesiva (contacto metal-metal). El intervalo (0-CF) de la figura 4.4.3 muestra un elevado coeficiente de fricción (f). La velocidad relativa entre superficies es baja o bien la cantidad de lubricante es insuficiente. Sucede un círculo vicioso de deterioro dado que un rozamiento alto genera más calor, decrece entonces la viscosidad y se reduce su capacidad de carga. Una situación de esta naturaleza ocurre durante arranques, grandes variaciones de velocidad, elevadas cargas, alta aceleración, calentamientos del aceite, etc.
La eficacia de la película depende de la composición química del aceite.

√ **Lubricación de capa gruesa (CG) ó Hidrodinámica.**
Con el aumento de velocidad V (> CG) ocurre un efecto favorable de cuña hidrodinámica entre el fluido y el cuerpo en movimiento. Se establece una presión dinámica que eleva el sólido separando las superficies completamente. El espesor efectivo de la película (5 - 250 micrones) es entonces mayor que las irregularidades. Esta lubricación evita el desgaste de las piezas, ya que no hay contacto entre ellas. La consistencia y capacidad de la película dependen de la velocidad (V), viscosidad (μ) y carga aplicada (P).
Sin embargo, si la viscosidad aumenta demasiado se incrementa también la fricción (f) según muestra la figura 4.4.3, por este motivo es conveniente que el sistema tribológico opere en la zona marcada por un rectángulo ubicado inmediatamente posterior al cambio de estado (lubricación mixta-lubricación hidrodinámica).

Pueden existir estados intermedios (parcialmente hidrodinámica o mixta) durante regímenes transitorios de operación (intervalo CF- CG en la figura 4.4.3).

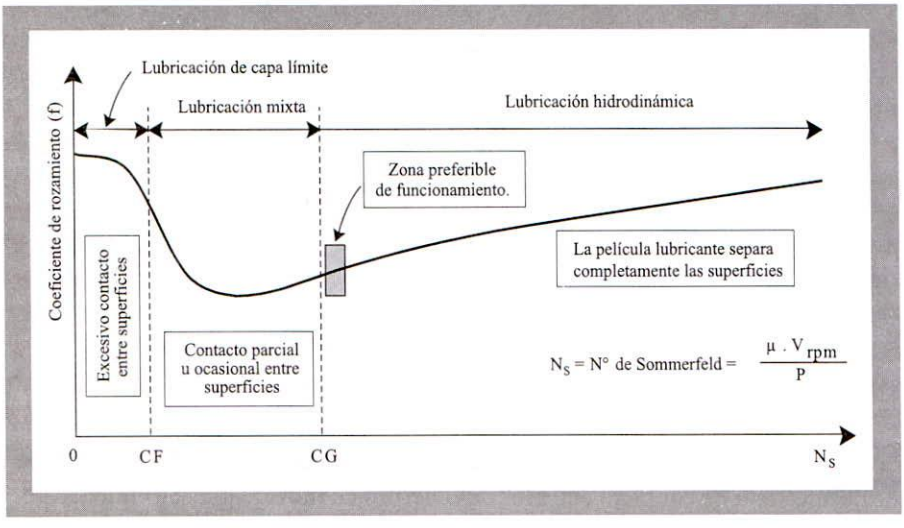


Figura 4.4.3 Curva de Stribeck[1].

√ **Lubricación de alta presión ó Elasto - hidrodinámica (EHD).**
Se presenta una situación de estas características en cojinetes antifricción (rodamientos), levas o en la línea de paso de los dientes de engranajes, por ejemplo. Cuando un elemento (bola, rodillo, aguja, etc.) rueda por la pista, se generan altas presiones que tienden a flexionar cíclicamente las superficies metálicas.
La carga puede llegar a valores muy elevados (hasta 12.000 Kg/cm^2) en las zonas pequeñas de contacto (área de presión hertziana) disminuyendo, por consiguiente, el espesor de la película hasta menos de 1 micrón. El aceite se encuentra sometido a la acción de altas presiones y excesivos gradientes de temperatura. Las partículas, las impurezas, el calor y el agua atacan considerablemente este estado de lubricación.

1 En 1902 Stribeck realiza experimentos para medir la fuerza de fricción sobre cojinetes en función de la velocidad de giro de un eje (rpm), la carga aplicada y la viscosidad. Con anterioridad (1883) se publica la primera ecuación en la que aparecen dos parámetros adimensionales, la carga y la relación longitud / diámetro (Ley de Petroff).

La carga lubricante debe:

√ Reducir el desgaste abrasivo (fricción) y adhesivo entre superficies con movimiento relativo. (Máximo aprovechamiento de la vida de los mecanismos).
√ Mantener separadas las superficies de contacto deslizante reduciendo la fricción.
√ Transferir y disipar el calor generado por los mecanismos en operación (conductividad térmica).
√ Proteger las superficies contra sustancias agresivas (corrosivas y adherentes).
√ Mantener en suspensión y transportar los contaminantes hacia los filtros.
√ En ciertas aplicaciones, transmitir potencia y movimiento (circuitos hidráulicos).
√ Evitar el ataque químico sobre las partes y componentes de la máquina.

Los aceites dieléctricos[1] constituyen un caso especial y se utilizan como carga aislante en transformadores de distribución eléctrica.

4.4.4 Formulación y clases de Lubricantes

La mayoría de los aceites de uso actual son formulados con una base **mineral**. La metodología y los procesos de destilación utilizados por las refinerías son demasiado complejos y exceden los límites propuestos para el presente trabajo. Simplemente se mencionarán las etapas más importantes para lograr un aceite mineral terminado.

Por destilación se separan del crudo las impurezas y se obtiene, en una primera etapa y a presión atmosférica, los cortes más livianos como naftas, gas licuado, solventes, kerosenes, gas oil, etc. Luego, por destilación al vacío, se eliminan los asfaltos logrando distintos cortes que posteriormente son refinados, desafaltados y desparafinados. Al producto resultante (aceite base mineral refinado) se le incorporan aditivos (hasta un 30% en volumen) obteniendo el lubricante en su estado terminado. Figura 4.4.4.

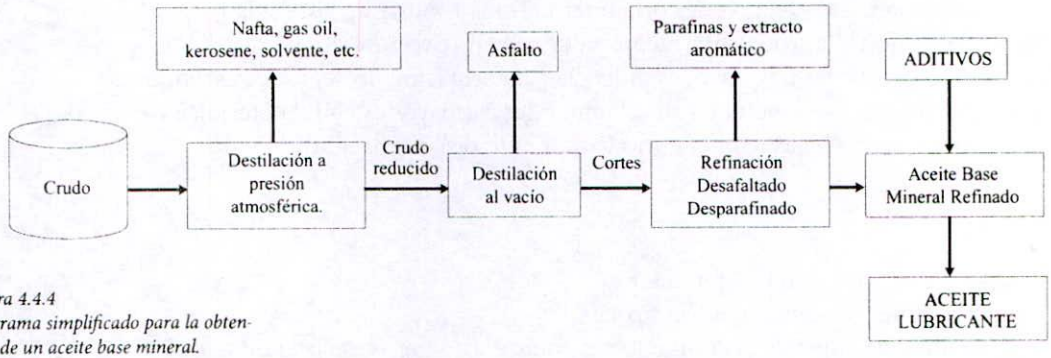


Figura 4.4.4
Diagrama simplificado para la obtención de un aceite base mineral.

La desafaltación logra cortes menos viscosos y con menor tendencia a la formación de residuos carbonosos. La refinación extrae del hidrocarburo los compuestos aromáticos con malas propiedades de lubricación. A su vez, el desparafinado (con solventes) elimina las estructuras moleculares que le confieren al aceite un elevado punto de congelación. Los aceites minerales del tipo parafínicos (sin desparafinar) tienen la característica de ser sólidos a temperatura ambiente.

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos de distinto tipo (parafínico, nafténico y aromático). En función del origen (yacimiento) el crudo puede contener diferente carga porcentual de cada compuesto. La tabla 4.4.2 ilustra el porcentaje aproximado de hidrocarburo que contiene cada categoría de crudo.

Aceite	Parafínico	Nafténico
% Cp	63 - 65	32 - 34
% Cn	31 - 33	42 - 46
% Ca	3 - 8	5 - 16

Tabla 4.4.2
Presencia porcentual del tipo de hidrocarburo por clase de crudo (Fuente YPF).

1 Ver punto 4.4.7 "Parámetros Específicos de Diagnóstico".

Los aceites base mineral son catalogados de acuerdo a las siguientes propiedades[1].

- *Viscosidad cinemática (v).*
- *Índice de viscosidad (IV), (variación de la viscosidad con la temperatura).*
- *Densidad (ρ).*
- *Punto de Inflamación, (temperatura a la que se inflama la superficie del aceite). Define las características volátiles.*
- *Toxicidad.*
- *Punto de congelación, (temperatura a la que el aceite alcanza 22.000 cSt de viscosidad).*

Existe un proceso alternativo de refinación denominado "Hidro-Refinado"[2] ó "Super-Refinado" que logra aceites con menor cantidad impurezas. Se eliminan casi totalmente los elementos nocivos como nitrógeno, azufre, metales pesados, etc. Los lubricantes formulados con base hidrorefinada poseen un comportamiento similar a los sintéticos.

Aceites Sintéticos

Finalmente se encuentran los aceites cuya base es **sintética**. Se obtienen por síntesis química y el resultado es un compuesto base cuyas moléculas son "clones" de un modelo molecular diseñado con características particulares para cada necesidad. Poseen una estructura molecular definida y conocida. Son aceites "puros" pues carecen de impurezas como azufre, nitrógeno, cadenas aromáticas, metales pesados, etc. y soportan condiciones más extremas de operación. Algunas de sus propiedades superan a la de los aceites minerales (índice de viscosidad, densidad, resistencia a la oxidación, etc.).

Principales beneficios:

- √ Mayor resistencia a las fuerzas de corte interno (mejor índice de viscosidad).
- √ Mayor resistencia a la oxidación (menor intervalo entre reemplazos).
- √ Mayor detergencia natural (menor tendencia a la formación de depósitos carbonosos).
- √ Mayor resistencia para operar en altas temperaturas (mayor estabilidad térmica).
- √ Mejor lubricación a bajas temperaturas (bajo punto de congelación).

Principales desventajas:

- √ Elevado costos para algunas aplicaciones.
- √ Algunos compuestos sintéticos son tóxicos.
- √ Incompatibilidad con ciertos componentes como elastómeros, sellos, juntas, etc.
- √ Dificultad en disolver ciertos aditivos.

Se agrupan por familia y, a continuación, se resumen las características más sobresalientes de algunas de ellas.

- **Polialquilen glicol (PAG's ó Poliglicol)**
  Alto índice de viscosidad (> 150), resistente al uso en altas temperaturas. Baja tendencia a la formación de lodos, resistencia a la oxidación. No compatible con la familia de los PAO's. Baja compatibilidad con elastómeros, pinturas, etc. Baja solubilidad a gases como propano y butano. Alta higroscopicidad. Costo medio o elevado si se compara con un aceite mineral. Se usa en compresores de gas, cojinetes antifricción y reductores de velocidad de operación severa, etc.
- **PAO's (Estructura polialfaolefina / Hidrocarburo sintético)**
  Buena compatibilidad con aceites minerales y alto índice de viscosidad. Bajo punto de congelación (buena lubricación en bajas temperaturas). Tendencia a la deformación de elastómeros, retenes y juntas.

---

1 Ver Anexo IV. "Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas".

2 Noria - Laboratorio Dr. Lantos. Seminario de Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceite, Edición 2004.

Costo medio o elevado comparado con los minerales. Se utiliza en motores de combustión, compresores, engranajes, turbinas de vapor, cierto tipo de bombas, etc.

- **Esteres dibásicos ácidos (DI's)**
  Buen punto de congelación. Muy buena tolerancia al paquete de aditivos. Baja agresividad a sellos y juntas. Buena resistencia a la oxidación y polaridad. Índice de viscosidad > 150. Compatibilidad media con aceites de base mineral. Costo medio. Se utiliza en compresores reciprocantes para altas temperaturas de operación y periodos prolongados.
- **Ester Poliesteres**
  Muy buena estabilidad a la oxidación y desempeño a altas temperaturas. Alto índice de viscosidad y bajo punto de congelación. Buena tolerancia a aditivos antidesgaste. Baja resistencia a la contaminación con agua. Costo generalmente muy elevado. Se utiliza en turbinas (aeronáuticas), engranajes de muy alta exigencia y compresores.
- **Siliconas**
  Buena compatibilidad con sellos y juntas, excelente estabilidad a la oxidación y muy alto punto de inflamación. Son aceites resistentes al agua y al vapor. Tienen muy bajo punto de congelación. Buen índice de viscosidad (> 190) y elevado costo.
- **Esteres fosfóricos**
  Punto de inflamación muy alto. Alta capacidad antidesgaste. Estabilidad a la oxidación y corrosión. Baja compatibilidad con aceites de base mineral. Agresivo a sellos, juntas, empaquetaduras y o'rings (alto poder plastificante). Costo muy elevado y difícil disposición final (riesgo ecológico).
- **Perfluoro-alquileter (PFPE)**
  Excelente resistencia a la oxidación pero muy baja estabilidad a la corrosión. Alta densidad. Amplio rango de temperaturas. Bajo índice de viscosidad (< 150). Buena compatibilidad con elastómeros y pinturas. Costo muy elevado.

4.4.5 Aditivos

Los aditivos son compuestos que se incorporan al aceite base con el fin de dotarlo de ciertas cualidades y características necesarias para un desempeño satisfactorio en el tiempo. Siendo el campo de aplicación de los aceites industriales muy amplio, cada tipo de lubricante requerirá realzar algunas propiedades por sobre otras. Ello obliga a los diseñadores a producir un paquete de aditivos específico para cada caso. Por ejemplo, un aceite hidráulico tendrá aditivos (clase y cantidad) diferentes que los utilizados para un aceite de motor.

Dado que los compuestos para aditivos pueden reaccionar químicamente entre sí y tener efectos colaterales adversos en el tribosistema, se los equilibra adecuada y proporcionalmente para que las funciones de uno no alteren las de los otros. Se busca siempre que el producto final posea una *formulación balanceada*. Esta es una de las razones por las que no es conveniente, sin un análisis profesional adecuado, ni el mezclado de aceites ni el aditivado adicional para *fortalecer*. Los aditivos se incorporan exclusivamente en la etapa de fabricación del lubricante, salvo estudios técnicos calificados que garanticen la compatibilidad.

Siendo elementos de sacrificio en el aceite, los aditivos han permitido alcanzar mayor intervalo entre reemplazos y reducir el desgaste de los mecanismos lubricados. Se incorporan en cantidades variables desde 0,2 a 30% del volumen, suspendidos (como micro sólidos) o disueltos (como líquidos). La combinación acertada de la mezcla, permite que ciertas propiedades del aceite base se vean potenciadas o fortalecidas. Otras características las incorpora totalmente el aditivo porque no están presentes naturalmente en el aceite base.

- **Antioxidantes**. Los antioxidantes tienen la función de retrasar el proceso de oxidación (envejecimiento) inhibiendo la formación de radicales libres y peróxidos. Conforme el aceite se oxida (reacciona con el oxígeno) genera más ácidos disueltos que facilitan la corrosión de las superficies metálicas. Los aditivos antioxidantes demoran el inicio de la oxidación y, por consiguiente, la formación de lodos (insoluble), lacas (depósitos adheridos por alta temperatura) y barnices. Se adicionan en

bajas concentraciones (0,1 a 0,5%). En aceites minerales se utilizan compuestos como el *di-alquil-ditiofosfato de zinc* (ZDDP), *fosfitos orgánicos* o *fenoles*; en aceites sintéticos, *imidazolinas* y *aminas aromáticas*. Si bien el ZDDP es también un compuestos antidesgaste (molécula mixta orgánica - inorgánica), se lo conoce como un efectivo "destructor de peróxidos". Lamentablemente la reacción destructiva que logra contra los peróxidos es a expensas de su sacrificio (agotamiento).

- **Inhibidores de Corrosión**. El agua y los productos ácidos son los causantes del desgaste corrosivo y la formación de herrumbre (oxidación de metales ferrosos). Los inhibidores de corrosión forman una película polar[1] adherente y delgada sobre las superficies metálicas. Siendo que la película repele el agua, evita o inhibe el ataque corrosivo. Para motores de combustión interna se utilizan *sulfonatos básicos*. En turbinas, sistemas hidráulicos y otras aplicaciones se formulan con *olefinas fosfosulfuradas* y *ácidos grasos* de cadena larga. Además, protegen los cojinetes de fricción (cobre, estaño y plomo) aislando las superficies de los ácidos disueltos.

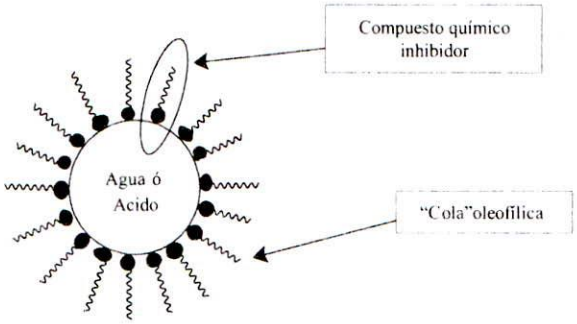


Figura 4.4.5 Aditivos inhibidores de herrumbre y corrosión.

- **Antiespumantes**. Durante el funcionamiento normal, el aceite se agita formando espuma. Los elementos antiespumantes ayudan a mantener elevada la tensión superficial del fluido. Esto hace que las burbujas de aire se rompan rápida y fácilmente cuando llegan a la superficie. Se utilizan mayormente *siliconas* y *polímeros orgánicos* en una proporción de entre 5 y 15 ppm (partes por millón, 1 ppm = 0,0001%). Los bajos valores de adición obedecen a que la silicona no es soluble en aceite (requiere muy buena dispersión).
- **Depresores del punto de congelación**. Estos aditivos previenen la solidificación del aceite disminuyendo la temperatura a la cual el fluido presenta problemas de circulación. El proceso de congelación se encuentra vinculado a la cristalización de las ceras parafínicas residuales en el aceite mineral. Si bien durante la refinación del aceite base se extrae la mayor cantidad de ceras, es necesario suplementar la base con aditivos que bajen el punto de fluencia. Los depresores del punto de congelación se absorben en los cristales y reducen su volumen, aumentando la fluidez. Se utilizan *polimetacrilatos* y *fenoles*.
- **Mejoradores del Índice de Viscosidad (IV)**. Los aceites base (sin aditivo) tienen malos índices de viscosidad (incapacidad de sostener la viscosidad conforme aumenta la temperatura)[2]. Se usan compuestos a base de polímeros orgánicos (hasta en un 10%) que reaccionan con el incremento de la temperatura manteniendo la viscosidad del aceite. Las moléculas del polímero se "hinchan" proporcionalmente con el aumento de la temperatura. Cuanto mayor es la temperatura, mayor el volumen de la molécula, y por consiguiente mayor el efecto "espesante" del compuesto.
- **Extrema Presión (EP)**. Tienen la particularidad de incrementar la resistencia a la carga de la película lubricante. Se usan dos tipos. El primer grupo corresponde a compuestos de *azufre fósforo* (llamados EP) que actúan cuando existe una liberación repentina de energía que los activa[3], si bien son químicamente agresivos, forman una película adherente que se transforma en un jabón metálico dúctil bajo la acción puntual de cargas elevadas.

  La segunda clase agrupa sólidos suspendidos o dispersos coloidalmente como el *disulfuro de Molibdeno* (MOS_2), *carbón* con estructura micro laminar como el *grafito*, o *Boratos*.

  Estos elementos forman una película protectora y resistente al desgaste adhesivo. Existen gran cantidad de productos comerciales de esta naturaleza.

---

*1 Se denominan elementos polares aquellos con alta tensión superficial. (**Polares**: agua, particulas de polvo, superficie metálica; **No Polares**: aceite, plástico, ceras, etc.). Fuente: Noria - Luntos. Seminario de Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceite, Edición 2004 Buenos Aires.*

2 Ver "Análisis Tribológico (Base + Aditivo + Máquina + Medio), punto 4.4.6.

3 Por ejemplo, una liberación repentina de energía ocurre cuando se encuentran los círculos primitivos de dos dientes que engranan.

- **Antidesgaste (AD)**. El desgaste es la pérdida de material debido al contacto metal – metal, presencia de abrasivos en la película lubricante y/o ataque de ácidos corrosivos. Los antidesgaste son elementos polares de protección para las superficies metálicas y la concentración va de 0,5 a 3%. Las sales de *zinc, fósforo* y *azufre* forman una película dúctil sobre la superficie cuando la temperatura no supera los 100 °C. Se utiliza también ZDDP y TCP (*Tricresil fosfato*).

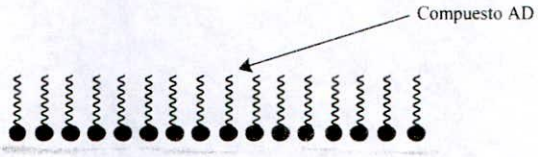


Figura 4.4.6 Elementos polares antidesgaste.

- **Dispersantes.** Su principal función es maximizar el tiempo de suspensión de las partículas. Químicamente se constituyen de una cabeza polar y una cola soluble en aceite (oleofílica). Las cabezas polares se adhieren a las partículas envolviéndolas y manteniéndolas en suspensión para luego ser transportadas a los filtros o eliminadas en el reemplazo de la carga lubricante. Se aplican compuestos de *alquenil succinimidas, ésteres y poliesteres de alto peso molecular* y *sales de amonio de ácidos orgánicos.*

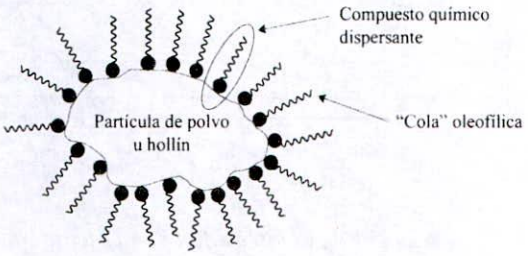


Figura 4.4.7 Compuesto de dispersante actuando sobre una partícula de polvo.

- **Detergentes**. Cumplen dos funciones principales. La primera es controlar los depósitos y, la segunda, neutralizar los ácidos generados por la combustión que provocan corrosión. Trabajan en la zona de aros, cilindros, pistones y válvulas, manteniendo las superficies libres de acumulación. Se utilizan jabones organo-metálicos de bario, calcio y magnesio. También sulfonatos, fenatos y sulfofenatos.
- **Desactivadores de metales**. Estos aditivos "encierran" las partículas metálicas (polares) para desactivarlas químicamente e inhibir su capacidad de generar ácidos disueltos. Son un tipo especial de antioxidantes que minimizan la actividad catalítica de los metales presentes en el tribosistema.
- **Agentes de oleosidad**. Son compuestos extremadamente polares. Forman una película adherente dúctil (microscópica) y tienen la capacidad de lubricar casi hasta su temperatura de fusión. Se utilizan ácidos grasos de origen vegetal o animal entre el 2 y el 10%. Son parte importante en la mayoría de los lubricantes, excepto en los aceites de transformador donde el mismo debe utilizarse prácticamente en su estado puro.
- **Aditivos Específicos**. Son aquellos aditivos relacionados directa y específicamente con la función del lubricante. Existe una amplia variedad comercial.

4.4.6 Análisis Tribológicos (Base + Aditivo + Máquina + Medio)

En esta parte se analizan algunas propiedades fundamentales de los lubricantes. Téngase en cuenta que la vigilancia de las variables sensibles permite determinar el estado de salud del aceite (base + aditivos) y del tribosistema a lo largo de tiempo.

4.4.6.1 Viscosidad Cinemática e Índice de Viscosidad (IV)

Una selección equivocada del grado de viscosidad puede provocar un deterioro acelerado en los componentes de la máquina. La viscosidad cinemática se especifica habitualmente en Centistoke [cSt] (1 cSt = 1 mm^2/seg). Cuando se analiza viscosidad siempre debe referirse a un valor de temperatura. Por ejemplo, un aceite ISO 68 posee aproximadamente 68 cSt a 40 °C y 8 cSt a 100 °C.

El índice de viscosidad (IV) representa la variación de la viscosidad con la temperatura (entre 40 y 100 °C). Es un indicador de la capacidad que tiene el fluido de mantener la viscosidad conforme aumenta la temperatura. Cuanto mayor es el IV menor será el cambio de viscosidad con la temperatura. Los aceites *monogrado* de origen mineral poseen bajos IV (entre 95 y 105); los comercialmente llamados *multigrado*, con aditivos mejoradores del IV, llegan a valores de hasta 150. Estos compuestos logran que, por ejemplo, un aceite 10W-30 se comporte como un SAE 10W a -20 °C y como un SAE 30 a 100 °C. Figura 4.4.8.

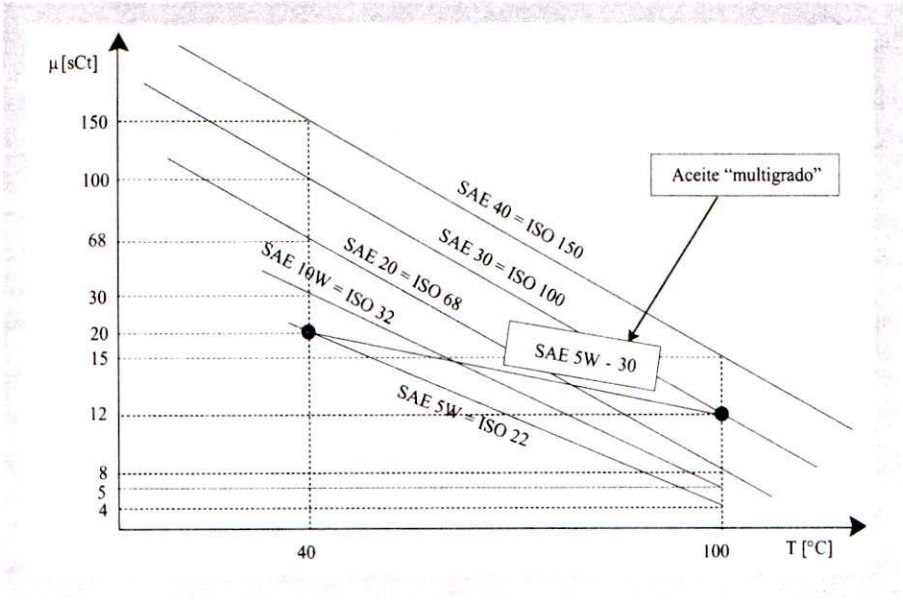


Figura 4.4.8 Variación de la viscosidad con la temperatura para diferentes aceites.

Nota: En rigor la ley de variación de la viscosidad con la temperatura no queda definida a través de una recta. Se expresa mediante la siguiente ecuación logarítmica[1].

$$\log (\log [\mu + c_1]) = \log T + c_2$$

μ es la viscosidad en cSt, T la temperatura del aceite en °K y, c_1 y c_2 son constantes para cada aceite.

El Número SAE proviene de un sistema de clasificación internacional para la viscosidad de los aceites de motor, transmisión y diferencial, establecido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE. Estos números no representan en ningún caso la calidad del aceite, se refieren exclusivamente a la viscosidad.

Un aceite nuevo perderá la capacidad de sostener la viscosidad conforme se incrementan las horas de funcionamiento (ruptura química del mejorador de IV). Es importante, por consiguiente, controlar la variación del Índice de Viscosidad a medida que transcurre el tiempo de operación. El cambio (disminución) del IV denota el estado de degradación de estos aditivos y se verifica ensayando la viscosidad a 100 °C.

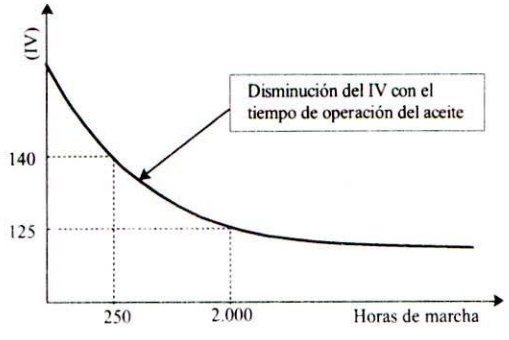
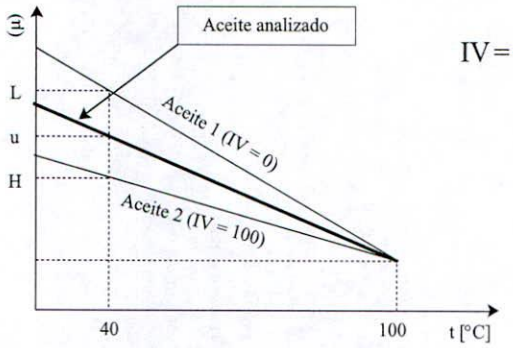


Figura 4.4.9 Ejemplo de la disminución del índice de viscosidad (IV) con el tiempo de operación.

1 Deducida a partir de la ecuación de Walther, y que no es aplicable al caso de aceites multigrado pues éstos no se comportan estrictamente como fluidos newtonianos.

El índice de viscosidad puede determinarse en forma gráfica (ASTM D-2270[1]) o bien a través de la ecuación 4.4.2. Se toma la referencia IV de dos aceites experimentales (IV=0 y IV=100) que posean la misma viscosidad a 100 °C que el aceite ensayado.



$$IV = \frac{L - u}{L - H} \times 100 \qquad (4.4.2)$$

Figura 4.4.10 Cálculo del índice de viscosidad.

Equivalencias de Viscosidad

ISO VG (cSt)	SAE (Motor)		SAE (Engranajes)	
10	--		--	
15	0 W		--	
22	5 W	--	70 W	--
	10 W			
32	15 W		75 W	
46	20 W	20		80
68			80 W	
100	25 W	30		85
			85 W	90
150		40		
220		50		
320	--	60	--	140
460				
680		--		
1000				250

Tabla 4.4.3 Equivalencias de viscosidad ISO VG - SAE.

Resulta beneficioso contar, a través de un análisis de laboratorio, con la viscosidad del aceite nuevo porque las normas internacionales aceptan variaciones de +/- 10% en los valores especificados por la norma de clasificación ISO VG. Esto hace suponer que no es seguro tomar el valor de la viscosidad indicado en las hojas técnicas para establecer límites de *alerta* o *alarma*.

Existen diversos factores a considerar para seleccionar el grado de viscosidad óptimo para un tribosistema. El nivel de abrasivos, las cargas de impacto, las bajas velocidades y las altas temperaturas de funcionamiento son, entre otras, características que obligan a optar por viscosidades elevadas. Las situaciones que toleran menores viscosidades incluyen el uso de lubricantes con aditivos EP, altas velocidades, superficies suaves y sistemas refrigerados.

Sin embargo, en muchas aplicaciones es necesario llegar a una relación de compromiso. Habrá mecanismos (dentro del mismo tribosistema) que por sus características toleran menor viscosidad. Esto ocurre con las cajas de engranajes cerradas en las que el primer tren (piñón y corona de alta velocidad) requiere una viscosidad más baja respecto al tren de salida que posee una menor velocidad tangencial. El lubricante seleccionado deberá satisfacer ambas condiciones de trabajo de la manera más eficaz. En la tabla 4.4.4 se presenta un resumen de las fallas sintomáticas por viscosidad, las causas de falla en el tribosistema y las acciones de mantenimiento más convenientes. Sólo se indican algunas posibles causas y acciones contingentes; sin perjuicio de lo cual podrán existir otras muchas, imposibles de sintetizar en este trabajo.

---

1 Ver Anexo IV. "Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas".

Falla Sintomática en el Aceite	Causa raíz en el Aceite		Ensayos de Validación [Tendencia]	Causa raíz en el Tribosistema	Consecuencia	Mantenimiento	
	Reversible	Irreversible				Proactivo	Restaurativo*
Incremento de Viscosidad	--	Oxidación (envejecimiento).	TAN y FTIR (para oxidación) [Incremento] Análisis de Elementos para Aditivos [Agotamiento] Olor [Mal] Color [Oscurecimiento] Densidad [Incremento]	Alta temperatura de operación. Agua por condensación de la humedad del aire o contaminación. Alto porcentaje de aire disuelto. Elevada cantidad de partículas metálicas (Cobre, Acero, Plomo). Azufre presente como impureza del aceite o disuelto en el combustible.	Formación de barniz adherente y abrasión. Depósitos de lacas y barnices en superficies expuestas a altas temperaturas puntuales. Generación de catalizadores metálicos. Fatiga superficial.	Disminuir temperatura de operación y/o batido del aceite. Eliminar fuente contaminante de líquidos y sólidos. Estudio Tribológico del sistema: desgaste, partículas e impurezas.	Limpieza de mecanismos. Filtrado o reemplazo del lubricante.
	--	Agotamiento de aditivos.	Análisis de Elementos para Aditivos [Agotamiento]	Alteración del tiempo entre reemplazos. Lubricante equivocado. Elevada contaminación.	Formación de barniz adherente y fatiga superficial.	Estudio Tribológico del sistema.	Reemplazo del lubricante.
	--	Volatilización.	Análisis de Elementos [Aumenta concentración de aditivos]	Lubricante inadecuado o alta temperatura de funcionamiento.	Formación de lodos y lacas. Desgaste corrosivo.	Estudio Tribológico del sistema.	
	--	Suspención de hollín y formación de lodos (óxidos insolubles).	Prueba de "gota" [Mancha oscura en el centro]. Oxidos Insolubles (ASTM D-893) [Aumento].	Mezcla muy rica en combustible, fuga de gases al carter, filtro de aire tapado, alteración del tiempo entre reemplazo.	Provoca el agotamiento de los dispersantes y detergentes. Genera altos niveles de incrustación, depósitos y lodos. Consumo excesivo de combutible.	Eliminar fuente de generación.	Reemplazo de filtro y lubricante.
	Contaminación con agua (emulsión) [Reversible por deshidratación].	--	Contenido de agua (ASTM D-95) [Incremento]. Crepitado [Positivo].	Comunicación de circuitos, combustión o condensación por contacto con la atmósfera.	Desgaste corrosivo y formación de herrumbre. El agua potencia la acción de los ácidos corrosivos y aumenta la corrosión y formación de herrumbre. Se hidroliza y lava el paquete de aditivos.	Eliminar fuente de contaminación.	Separación, deshidratación o reemplazo del lubricante
	Aereación [Reversible por separación].	--	TAN [Incremento]	Batido de aceite / Falla aditivo antiespumante.	Desgaste abrasivo y/o adhesivo. Baja resistencia de la película lubricante y fatiga superficial. Carbonización y depósitos de barniz. Formación de espuma y cavitación.	Eliminar causa de aereación.	Separación o reemplazo del lubricante.
	--	Contaminación con anticongelante (glicol).	Análisis de Elementos [Boro, sodio o potasio]. Densidad [Incremento]. FTIR [Positivo].	Fallas funcionales del circuito de enfriamiento, falla en juntas o sellos.	Formación de lodos. Herrumbre y corrosión. Disminuye la bombeabilidad del aceite a baja temperatura. Cae la resistencia de la película lubricante. Degradación de filtros.	Eliminar fuente o causa de contaminación.	Reemplazo del lubricante.
Disminución de Viscosidad	--	Contaminación con combustible no quemado.	Punto de inflamación [Disminución]	Fallas funcionales en la línea de combustible, problemas en inyectores, excesivas fugas de gases al carter, aros / camisas de pistón dañados.	Se produce la dilución del aceite y falla la película lubricante (pérdida de viscosidad), lavado de aditivos, corrosión y desgaste abrasivo. Aumento del nivel de aceite.	Eliminar fuente de contaminación.	Reemplazo de filtro y lubricante.
	--	Craqueo del aceite base (efecto térmico).	Punto de inflamación [Disminución]	Alta carga aplicada o alta temperatura de operación.	Fatiga superficial y desgaste.	Eliminar causas de craqueo.	Reemplazo del lubricante.
	--	Contaminación con solvente.	Cromatografía de gases [Positivo]. Olor característico del contaminante [Positivo].	Contaminación o restos de limpieza.	Disminuye la viscosidad y falla película lubricante. Barrido de aditivos y desgaste abrasivo.	Limpieza y eliminación de la fuente o causa del contaminante.	Limpieza y reemplazo del lubricante.
	--	Corte y cizallamiento de los mejoradores del IV.	Viscosidad a 100°C e índice de viscosidad. [Disminución]	Severas condiciones de operación.	Desgaste abrasivo y/o adhesivo en alta temperatura de funcionamiento.	Estudio Tribológico del sistema.	Reemplazo del lubricante.

Tabla 4.4.4 Diagnóstico y Fallas Sintomáticas por variación de Viscosidad.

* *Dependiendo del nivel de deterioro de los mecanismos, es posible que sea necesaria una intervención mayor en la máquina.*

4.4.6.2 Acidez y Basicidad

El TAN (Total Acid Number) y el TBN (Total Base Number) son números de neutralización, e indican la tendencia al agotamiento de aditivos como el ZDDP, detergentes e inhibidores de corrosión. El TAN mide el nivel total de ácidos débiles (potencialmente corrosivos) disueltos en el aceite; el TBN, el nivel de reserva alcalina del paquete de aditivos. El monitoreo del TBN es útil para aceites de cárter.

Con el índice de acidez (TAN) se monitorea la degradación o envejecimiento del aceite. El TAN de un aceite nuevo se compone de la acidez de la base (20% aproximadamente) y la acidez de los aditivos (80% - fundamentalmente debido a los aditivos antidesgaste). Es una magnitud escalar y representa los miligramos de hidróxido de potasio (KOH) que hacen falta para neutralizar un gramo de aceite (en el que se encuentran disueltos los ácidos). El ensayo se realiza por titulación y tiene una incertidumbre de hasta 0,3 puntos. En aceites muy aditivados, el valor puede decaer inicialmente (consumo de aditivos) y, luego del punto de inflexión, aumentar sostenidamente debido al incremento de la concentración de ácidos.

$$\text{TAN (Aceite)} = \text{TAN (Base)} + \text{TAN (Aditivos)} \tag{4.4.3}$$

Cabe enfatizar que esta técnica pretende determinar la concentración de ácidos disueltos en el aceite. Por esta razón no se utiliza medición de pH que sólo indicaría la potencia ácida de la solución (aceite en este caso).

En aceites minerales, el valor TAN inicial normalmente se encuentra entre 0,1 y 0,3; los aceites sintéticos pueden comenzar con valores iniciales de hasta 1,5. Para establecer el valor de *alerta* es común incrementar de un 20 a un 40% el valor inicial (aceite nuevo). Como *alarma*, considerar un valor igual a dos veces el TAN inicial. Deben evitarse altos niveles de acidez porque, en presencia de agua, los ácidos alcanzan el máximo potencial corrosivo.

El TBN indica la reserva alcalina del paquete de aditivos, no de la base. Este parámetro de alta sensibilidad mide la alcalinidad de los detergentes. Recuérdese que los aditivos con reserva alcalina cumplen la función de neutralizar los ácidos generados por la oxidación del aceite y por la combustión (principalmente ácidos sulfúrico y sulfuroso provenientes del azufre presente en el combustible). Los ácidos mencionados tienen la capacidad de provocar corrosión sobre las superficies metálicas, sobreviniendo el consecuente desgaste corrosivo. El ensayo determina los miligramos de ácido clorhídrico alcohólico necesarios para neutralizar un gramo de aceite en el que está presente la reserva alcalina.

$$\text{TBN (Aceite)} = \text{TBN (Aditivos)} \tag{4.4.4}$$

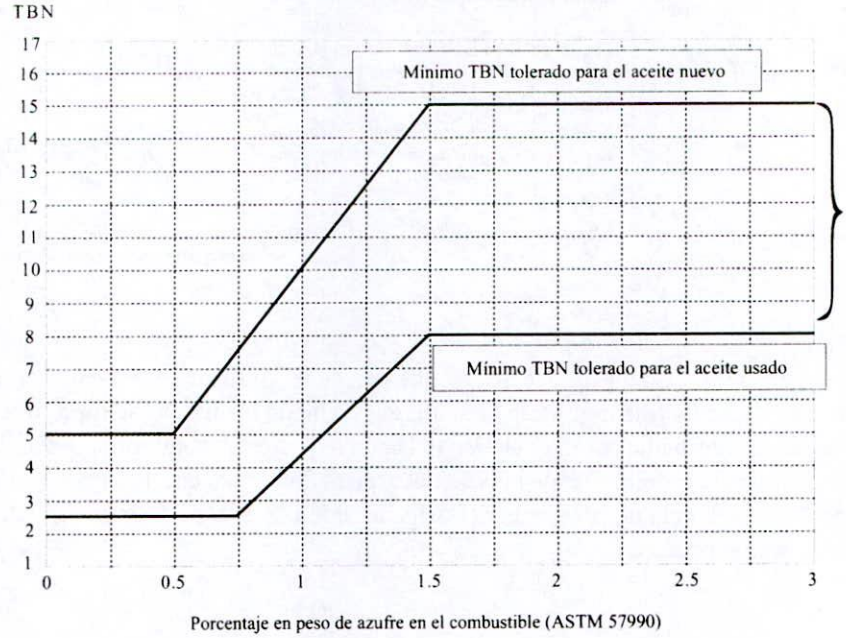


Figura 4.4.11 Límite inferior de alarma (TBN) en función del porcentaje de azufre en combustible. Noria - Laboratorio Dr. Lantos. Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceite, Edición 2004.

La figura 4.4.11 marca la tolerancia para los límites de TBN en aceites nuevos y usados de acuerdo al porcentaje de azufre disuelto en el combustible (diesel). Obsérvese la importancia del contexto operativo en este caso. Dos máquinas idénticas que consumen combustibles diferentes, seguramente deberán lubricarse con aceites de distinta formulación. Es posible que sea necesario pasar a un aceite de mayor TBN si el combustible que consume contiene mayor cantidad de azufre. De la misma forma sucede cuando es preciso fijar los valores absolutos de alerta y alarma para el parámetro TBN. Si se utiliza un diesel con 0,5% de azufre, el valor límite para el aceite usado no podrá ser inferior a 2,5 según muestra la figura 4.4.11. Sin embargo, cuando el combustible posee 1,5% de azufre disuelto, el valor mínimo tolerado para el aceite usado no deberá ser inferior a 8. Nótese que si se utilizase el primer aceite para la operación con 1,5% de azufre, no se alcanzaría ni siquiera con el aceite nuevo el valor mínimo requerido de detergencia.

A medida que disminuye la relación entre el TBN del aceite nuevo y del usado, disminuye también la capacidad de neutralizar ácidos disueltos, limpiar el sistema y mantener en estado de suspensión los contaminantes. Como valor de *alerta* suele adoptarse el 50% de TBN del aceite nuevo. El valor de alarma TBN podría ubicarse cercano al 40% de la misma referencia, siempre que la selección del lubricante sea la acertada para la condición de combustible. La tabla 4.4.5 agrupa las posibles causas de un bajo TBN.

Falla Sintomática en el Aceite	Causa raíz en el Tribosistema	Consecuencia	Mantenimiento	
			Proactivo	Restaurativo*
Bajo TBN	*Intervalo prolongado entre reemplazos de aceite.*	*Desgaste corrosivo por elevada concentración de ácidos disueltos. Otros daños colaterales de desgaste por la inactividad del resto del paquete de aditivos.*	*Asegurar el cumplimiento de los intervalos de reemplazo y verificar la* ***clasificación API*** *del lubricante para la aplicación requerida.*	*Reemplazo de aceite o cambio de clasificación API.*
	Excesiva temperatura de funcionamiento.	*Oxidación del aceite, mayor actividad de los ácidos y falla de la película lubricante. Mayor desgaste por pérdida de película lubricante.*	*Disminuir temperatura de operación.*	*Reemplazo de aceite o cambio de clasificación API.*
	Combustible con alto contenido de azufre.	*Desgaste corrosivo por elevada concentración de ácidos disueltos.*	*Utilizar combustible con menor porcentaje de azufre o aceite con TBN más alto.*	*Reemplazo de aceite.*
	Inyección defectuosa o ingreso de combustible.	*Dilución, pérdida de viscosidad y falla de la película lubricante. Mayor desgaste abrasivo.*	*Eliminar las causas de fuga (aros o camisas dañados).*	*Reemplazo del lubricante.*
	Alto nivel de humedad en el aceite.	*El agua potencia la acción de los ácidos corrosivos. Aumenta la corrosión, la formación de herrumbre y la viscosidad.*	*Eliminar fuentes de contaminación.*	*Reemplazo del lubricante / Deshidratación.*
	Alta contaminación metálica.	*Las partículas metálicas favorecen el consumo de aditivos. Desgaste abrasivo excesivo. Fatiga superficial.*	*Eliminar fuente de generación de contaminantes. Filtración.*	*Reemplazo del lubricante y posible incorporación de aditivos.*

Tabla 4.4.5 Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática por TBN.

* Dependiendo del nivel de deterioro de los mecanismos, es posible que sea necesaria una intervención mayor en la máquina.

4.4.6.3 Oxidación

Cuando la base del aceite se oxida, produce ácidos que permanecen disueltos y favorecen la corrosión de las superficies metálicas. Se restringe así la vida útil del aceite de forma casi siempre **irreversible**. La oxidación no puede ser eliminada, como es el caso del agua o de ciertos contaminantes sólidos, porque se trata de una transformación química de la base del aceite. Comienza con la formación de radicales libres y peróxidos, y se potencia en presencia del oxígeno. Por esta razón, el aire atrapado en el aceite puede acelerar aún más el proceso.

Cuando el nivel de oxidación aumenta, hace lo propio el índice de acidez (TAN) en forma proporcional y, cuando se alcanzan elevados valores, también aumenta la viscosidad del aceite por la formación de moléculas de cadena larga (lodos) insolubles. Si bien algunos aceites base tienen mayor capacidad inherente de resistir el disparo de la oxidación (por ejemplo los sintéticos), sin el agregado de aditivos sería imposible alcanzar los estándares requeridos en la actualidad.

Los factores externos que más aceleran el proceso de oxidación son entonces:

- **Calor**
  La alta temperatura de funcionamiento es el principal iniciador del proceso de oxidación. También agota los aditivos, genera barniz, lodos y carbonización. Existe una regla práctica y conocida que dice: *Si a un aceite que trabaja por encima de 70 °C se le baja la temperatura de funcionamiento en 10 °C, aumenta al doble su vida útil.* Por cada 10 °C que se baje la temperatura de operación, se aumenta en una proporción de 2 su vida útil.
  Además, si la viscosidad disminuye por el efecto de la alta temperatura, afecta la resistencia de la película lubricante con las consecuencias ya mencionadas.

- **Agua**
  El agua puede encontrarse en diferentes estados de coexistencia con el aceite. Puede estar **disuelta** (invisible) y sus moléculas estar dispersas como humedad (hasta 500 ppm dependiendo del tipo de aceite, vejez y temperatura). Puede existir en estado de **emulsión**[1] (nebuloso) en concentraciones de hasta 1.000 ppm formando glóbulos microscópicos. Esta situación lava el paquete de aditivos formando lodos, sedimentos y bacterias. Aumenta la viscosidad del aceite. Finalmente, puede aparecer en forma **libre** (> 1.000 ppm) y, al mezclarse con el aceite, se asienta en el fondo de los depósitos o tanques.
  La velocidad de oxidación puede incrementarse en más de 10 veces con la presencia de agua, y en aceites dieléctricos reduce considerablemente la capacidad aislante. Además, tiende a favorecer la formación de espuma y aumenta la viscosidad cuando se encuentra en estado de emulsión.

- **Aire**
  El aire puede estar **disuelto** en niveles de hasta un 10% para aceites minerales. Otro estado posible es el **atrapado**, en el que se forman burbujas microscópicas inestables. Se presenta como nebulosidad y tiene efectos adversos sobre la capacidad térmica y la compresibilidad. Acelera el proceso de oxidación, cavitación y formación de barniz. También puede aparecer **libre** como glóbulos atrapados en las zonas estanco o altas del sistema. Trae efectos de compresibilidad y corrosión localizada. Por último, puede formar **espuma** en depósitos muy aireados (>30%). Siendo que el aire es rico en oxígeno, aumenta la oxidación del aceite. El TAN resulta proporcional al aire disuelto; un aceite cuya concentración de aire pasa de 3% a 12%, aumenta 4 veces el número de neutralización (el TAN pasa de 0.15 a 0.6).
  La aireación excesiva también incrementa la viscosidad y oscurece el aceite, por lo que el grado de viscosidad y el color pueden utilizarse como rápidos indicadores de falla sintomática.

- **Catalizadores metálicos**
  Las partículas más generadoras de acidez son las de cobre y acero. Menos nocivas resultan ser las de aluminio y plomo. En aceites sintéticos el proceso evoluciona más lentamente que en aceites minerales. Los dispersantes colaboran en el control de los catalizadores.

---

1 Emulsión: Sistema líquido formado por dos sustancias no miscibles, en el que una de ellas se encuentra dispersa en la otra en forma de gotas muy finas.

Falla Sintomática en el Aceite	Causa raíz en el Tribosistema	Consecuencia	Mantenimiento	
			Proactivo	Restaurativo*
Oxidación	*Excesiva temperatura de funcionamiento.*	*Oxidación del aceite, mayor actividad de los ácidos y falla de la película lubricante. Mayor desgaste por deterioro de la resistencia de la película lubricante.*	*Disminuir temperatura de operación.*	*Reemplazo del lubricante.*
	Excesivo aire disuelto.	*Ruptura de la película lubricante y desgaste excesivo.*	*Eliminar fuente de aereación ó cambiar el tipo de lubricante (mayor capacidad antiespumante). Modificar el diseño del mecanismo.*	*Reemplazo del lubricante.*
	Alta presencia de catalizadores metálicos.	*Las partículas metálicas favorecen la formación de ácidos. Desgaste corrosivo y abrasivo excesivo.*	*Eliminar fuente de generación de partículas. Filtración.*	*Reemplazo del lubricante y posible incorporación de aditivos EP y AD.*
	Contaminación con agua.	*El agua potencia la acción de los ácidos corrosivos y aumenta la corrosión y formación de herrumbre. Además, lava el paquete de aditivos. Degrada filtros y aumenta la viscosidad por emulsión del aceite.*	*Eliminar fuentes de contaminación.*	*Reemplazo del lubricante / Deshidratación.*
	Alto contenido de azufre en combustible.	*Desgaste corrosivo por elevada concentración de ácidos disueltos (sulfúrico).*	*Utilizar combustible con menor porcentaje de azufre o verificar TBN del aceite para la aplicación requerida.*	*Reemplazo de aceite o cambio de formulación (TBN).*

Tabla 4.4.6
Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática por Oxidación.

* Dependiendo del nivel de deterioro de los mecanismos, es posible que sea necesaria una intervención mayor en la máquina.

Se pueden utilizar los siguientes parámetros para confirmar el nivel de oxidación.

√ TAN (Índice de Acidez).
√ Incremento de la Viscosidad a 40 °C (para niveles altos de oxidación).
√ Agotamiento de aditivos.
√ Mal olor.
√ Color (oscurecimiento).
√ Incremento de la densidad.

4.4.6.4 Densidad

La densidad es una variable importante a tener en cuenta, su incremento podría indicar:

√ Contaminación con agua.
√ Contaminación con partículas.
√ Mezcla o contaminación con aceites sintéticos (mayor densidad).
√ Oxidación elevada.
√ Pérdidas por evaporación.
√ Contaminación con refrigerantes.
√ Alto contenido de hollín o carbonilla.

4.4.6.5 Agotamiento y Monitoreo de Aditivos

Las principales causas del agotamiento de los aditivos son el agua, el calor y los contaminantes sólidos. El agua hidroliza las moléculas del aditivo y el calor en exceso la degradación térmica, todo lo cual provoca o favorece la formación de hidroperóxidos y radicales libres (oxidación). Como se mencionó oportunamente, este proceso es irreversible para el aceite (pero proactivo para la máquina). El agua también puede "lavar" los aditivos haciendo que se depositen en el fondo de los depósitos y pierdan su capacidad activa. Los contaminantes sólidos, por su parte, saturan o agotan las moléculas haciendo que el aditivo precipite o quede atrapado en los filtros junto con los contaminantes.

El seguimiento del estado de aditivos, aparece como técnica principal en el mantenimiento proactivo de aceites lubricantes. A continuación, en la tabla 4.4.7, se ilustran los elementos básicos para formular aditivos, su función específica y las fallas sintomáticas para establecer su deterioro y el del aceite base.

Aditivo	Compuesto	Acción del Aditivo	Posibles Falla Sintomática* y [Tendencia]	Consecuencias Tribológicas
Antioxidante	Aceites Minerales: Ditiofosfato de zinc (ZDDP), fosfitos orgánicos o fenoles. Aceites Sintéticos: Sulfonatos, imidazolinas y aminas aromáticas.	Retardan el proceso de oxidación y disminuyen la formación de lodos (insolubles), lacas y barnices. Previenen el aumento de viscosidad.	Disminución de zinc (Zn), fósforo (P) y azufre (S) ó de los elementos de los aditivos orgánicos. Incremento del TAN.	Los ácidos disueltos facilitan la corrosión y la herrumbre por la reacción entre éstos y los óxidos metálicos de las superficies. Forman lodos.
Inhibidores de Corrosión	Compuestos de imidazol, benzotriazol y ZDDP. También sulfonatos básicos (motores de combustión), olefinas fosfosulfuradas y ácidos grasos (sistemas hidráulicos).	Forman una película polar que protege las superficies metálicas del agua y del ataque corrosivo.	Disminución de fósforo (P), zinc (Zn) y azufre (S). También disminución del ZDDP.	La corrosión y herrumbre generan desgaste y daño irreversible en las superficies metálicas como cojinetes.
Antiespumante	Siliconas y polímeros orgánicos.	Facilitan el ascenso y la ruptura de las burbujas de aire en el aceite aumentando la tensión superficial.	Disminución de silicio (Si).	Formación de espuma y cavitación. Formación de lodo, barniz y carbonización. Fatiga superficial y desgaste.
Depresores del Punto de Congelación	Polimetacrilatos, poliacrilaminas y fenoles.	Disminuyen el punto de congelación del aceite.	Incremento del punto de congelación.	Falla de película lubricante, abrasión, desgaste. Alta fricción entre metales a baja temperatura.
Mejoradores del Indice de Viscosidad	Copolímeros de etileno propileno (OCP) y polimetacrilatos. Otros compuestos a base de copolímeros.	Sostienen la viscosidad con el aumento de la temperatura.	Disminución de la viscosidad a 100 °C.	Disminuye la capacidad de carga de la película lubricante. Desgaste adhesivo.
Antidesgaste	Dialquil ditiofosfato (ZDDP) y Tricresil fosfato (TCP).	Forman una película polar que protege las superficies metálicas del desgaste abrasivo y rayado.	Disminución de zinc (Zn) y fósforo (P).	Desgaste de las superficies, daños irreversibles en los mecanismos.
Dispersantes	Compuestos de alquenil succinimidas, ésteres y poliesteres de alto peso molecular y sales de amonio de ácidos orgánicos	Mantienen en suspensión las partículas de polvo, hollín, agua, etc. Previenen el aumento de viscosidad y los depósitos. Pueden fallar por alta carga de hollín, contaminación con agua, anticongelante (glicol) y combustible no quemado que pasa al aceite.	Disminución de calcio (Ca) y magnesio (Mg).	Carbonización, lodos, lacas y barnices. Desgaste abrasivo y fatiga de superficies. Alta fricción. Formación de herrumbre.
Detergentes	Jabones organo-metálicos de bario, calcio y magnesio. Sulfonatos, fenatos y sulfofenatos	Controlan y evitan los depósitos sobre superficies. Además, neutralizan los ácidos generados por la combustión de los gases que pasan al aceite.	Disminución del TBN, calcio (Ca), magnesio (Mg) y en ocasiones bario (Ba).	Formación de depósitos (lacas y barnices). Alta fricción.
Desactivadores de metal	Derivados de los propilen diaminas o formadores de película como el benzotriazol.	Los primeros evitan que los iones metálicos (cobre, acero, plomo, etc.) catalicen la etapa de oxidación inhibiendo su capacidad de generar ácidos corrosivos. Los formadores de película evitan que los iones metálicos ingresen al aceite.	Disminución de calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y zinc (Zn).	La oxidación catalítica genera ácidos que facilitan la corrosión y la herrumbre.
Extrema Presión (EP)	Compuestos químicos de azufre - fósforo (EP) y sólidos suspendidos como boratos, MOS_2 y grafito.	Aumentan la resistencia de la película lubricante y forman una película adherente resistente al desgaste.	Disminución de azufre (S), fósforo(P), boro (B) y molibdeno (Mo).	Falla de película lubricante, abrasión, adhesión y desgaste. Alta fricción entre metales.

* NOTA: Se resumen en esta columna los posibles elementos a monitorear; sin embargo, no todos los lubricantes poseen la misma formulación de aditivos.

Tabla 4.4.7
Diagnóstico y Fallas Sintomáticas por Aditivos.

4.4.6.6 Contaminantes Sólidos

Cuando las partículas (impurezas) ingresan al tribosistema sufren un proceso de fragmentación y propagación. Las más grandes (en contacto con los mecanismos) se multiplican generando un número mayor de partículas de menor tamaño. Algunas serán transportadas a los filtros, mientras que otras, desafortunadamente, se sedimentarán. Las características más perjudiciales de una partícula son la cantidad, el tamaño y su dureza. La dureza aumenta conforme disminuye su tamaño. La limpieza de los lubricantes se mide en *unidades de limpieza* y su nivel afecta directamente la vida del equipo. Un aumento de los contaminantes sólidos representa una *falla sintomática* en la máquina.

Código de Limpieza ISO 4406

El código ISO 4406 se utiliza para cuantificar la concentración de partículas, metálicas y no metálicas (cantidad y tamaño), que hay en un aceite. Define la cantidad de partículas para cada tamaño predefinido por comparación. Es el método de recuento más difundido y aceptado en la actualidad. Consiste en hacer pasar cierto volumen de aceite [cm^3] a través de una membrana normalizada de 0,8 micrones (μm) absolutos y luego observar al microscopio. El observador determina la cantidad de partículas para cada tamaño y define el número ISO valiéndose de una tabla como la mostrada en la figura 4.4.12.

Cantidad de partículas por cm^3		
Desde	**Hasta**	**Número ISO**
> 80.000	≤ 160.000	24
40.000	80.000	23
20.000	40.000	22
10.000	20.000	21
5.000	10.000	20
2.500	5.000	19
1.300	2.500	18
640	1.300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1

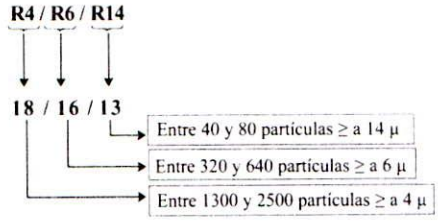


Figura 4.4.12
Concentración de partículas de acuerdo al código ISO 4406.

La técnica arroja tres números que representan la cantidad de partículas iguales o mayores a **4**, **6** y **14** micrones respectivamente (de izquierda a derecha). Por ejemplo, un código **18/16/13** indicaría que la muestra de aceite contiene entre 1300 y 2500 partículas mayores o iguales a 4 μm, entre 320 y 640 partículas mayores o iguales a 6 μm y entre 40 y 80 mayores o iguales a 14 μm. Habitualmente se utilizan sólo los dos últimos números del código (R6/R14) omitiendo el conteo de partículas mayores o iguales a 4 μm. Recuérdese que 1 μm (micrón) = 0,001 mm (una milésima de milímetro).

Es conocido el hecho que mejorando en una unidad la limpieza del lubricante, se quintuplica la vida de la máquina. La vida de los mecanismos se relaciona directamente con el grado de limpieza del lubricante. Es muy importante mantener los aceites dentro de los valores límites establecidos (parámetros sensibles proactivos de control), y cualquier mejora que el área de mantenimiento pueda lograr, redundará en la extensión de la vida del tribosistema.

El nivel de limpieza requerido para el aceite dependerá del tipo de máquina y de su contexto operativo. Se debe establecer el nivel óptimo para cada equipo prioritario y luego tomar las acciones proactivas necesarias para reducir el ingreso o implementar, de ser posible, rutinas de filtrado. Las rutinas de filtrado incluyen la utilización de circuitos paralelos en línea. Permiten lograr valores óptimos de limpieza sin retirar de servicio las unidades, y están constituidos por bomba y filtros de alta eficiencia.

Dependiendo de la causa raíz de falla, generalmente un aumento en el código ISO 4406 va acompañado de un aumento del número de partículas ferrosas identificadas. Los aceites nuevos, excepto a pedido especial, no especifican el nivel de limpieza, por lo que siempre resulta apropiado medir el nivel de limpieza del aceite nuevo y luego establecer valores de alerta y alarma. En ocasiones, incluso, se realiza un prefiltrado antes de cargar el lubricante (sistemas hidráulicos, transformadores y ciertos reductores).

Medios Filtrantes

El mercado ofrece gran variedad de elementos filtrantes. Los hay construidos en fibra de vidrio (borosilicato) y en celulosa. Los primeros tienen ventajas competitivas como no absorber agua, más resistencia a temperaturas elevadas y mayor capacidad de retención que los celulósicos.

Los filtros pueden ser de tasa nominal o absoluta. Un filtro de tasa absoluta indica el tamaño en micrones (μm) de la partícula más grande que pasa por él y, además, la cantidad de partículas mayores o iguales a ese tamaño que retendrá del total entrante. Por ejemplo, un filtro de tasa absoluta denominado como $\beta_3 \geq 200$, dejará pasar sólo una partícula de tamaño mayor o igual a 3 micrones de 200 entrantes. Esto se denomina **eficiencia** del filtro y para este caso será:

$$\eta[\%] = \frac{\beta - 1}{\beta} \times 100 \qquad 4.4.5$$

$$\eta[\%] = \frac{200 - 1}{200} \times 100 = 99{,}5\%$$

Lo que significa que un filtro de estas características tendrá una eficiencia del 99,5% para las partículas mayores o iguales a 3 μm.

4.4.6.7 Parámetros Generales de Diagnóstico

Antes de analizar puntualmente cada tipo de lubricante, es importante mencionar los ensayos de carácter general que todo análisis de aceite usado debe incluir. Algunas variables de control son comunes para la mayoría de los aceites, en cambio otras, son específicas para una determinada clase de lubricante. Un ejemplo, es el estudio de las propiedades dieléctricas (IRAM 2341) que se aplica exclusivamente para aceites de transformador. De la misma forma, sucede con el número de neutralización TBN más común en análisis de motores diesel. Cada parámetro (reversible o irreversible) puede indicar una falla sintomática en el aceite (base ó aditivo) o una falla sintomática en la máquina. Vale decir que, la variación por encima o por debajo del valor nominal, indicará anomalía en el seno del tribosistema. Los especialistas aconsejan, sin embargo, analizar cada falla sintomática en relación a todo el sistema (análisis sistémico), buscando otros indicadores que ratifiquen o descarten la sospecha del desvío. Por ejemplo, el incremento de viscosidad (tomado en forma aislada) no tiene en sí mismo un significado determinista, deberá confirmarse con otros parámetros de control como el índice de acidez (TAN), índice de viscosidad, falta de elementos del aditivo, presencia de elementos de desgaste, contenido de agua, nivel de sólidos contaminantes, etc.

Los ensayos que más colaboran para un mantenimiento proactivo de aceite usado, son[1]:

- Viscosidad (40 °C y 100 °C) e Índice de viscosidad
- Densidad
- Punto de inflamación

---

1 Ver Anexo IV "Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas".

- TAN / TBN
- Potencial ácido (pH)
- Oxidación
- Resíduos, color y envejecimiento
- Elementos de desgaste, aditivos y contaminantes (Ver tabla 4.4.8)
- Agua / Humedad
- Carga de hollín, carbonilla o sedimentos
- Cenizas
- Recuento de Partículas
- Propiedades dieléctricas (para aceites de transformadores, condensadores o cables huecos)

Es importante también el análisis de los elementos (desgaste, aditivos o contaminantes). El informe proactivo debe incluir un detalle con la concentración de cada elemento químico detectado en la muestra. Al momento de fijar valores de alerta y alarma (superior e inferior), es útil tener presente su origen. La tabla siguiente muestra los principales elementos, fuente posible y tendencia esperada.

Elemento	Fuente Posible y Tendencia esperada.
Magnesio (Mg)	Presente en ciertos accesorios de turbina y en aditivos de aceites de motor de combustión, agua dura, agua salada y algunos polvos ambientales. Normalmente disminuye por agotamiento de aditivo, aunque puede aumentar por contaminación. En todos los casos deberá analizarse la condición tribológica del sistema.
Zinc (Zn)	Presente en varios aditivos (AD y AO), también en aleaciones de bronce y compuestos cromados. Disminuye con el agotamiento de los aditivos y aumentaría por el deterioro de piezas de la máquina que lo contienen.
Fósforo (P)	Su disminución es proporcional al consumo o agotamiento de los aditivos AD y EP.
Calcio (Ca)	Puede tener una tendencia ascendente o descendente, dependiendo si la fuente es ingreso de contaminante o agotamiento de aditivos. Se encuentra en aditivos detergentes e inhibidores de herrumbre. También puede aparecer como contaminante por agua, polvo o ciertas grasas que contienen calcio. Los valores de alerta y alarma (superior e inferior) deben fijarse en función del tipo de aceite (comparación con el aceite nuevo) y del contexto de funcionamiento.
Boro (B)	Con frecuencia presente en aditivos EP, decreciente por agotamiento. Aumento por contaminación de refrigerante en aceite.
Silicio (Si)	Su origen es muy variado. Es un contaminante por excelencia (polvo, tierra, fibra de vidrio, granito, asbestos, etc.). Además, es el compuesto fundamental de aditivos antiespumantes. Puede aumentar (contaminación) o disminuir (agotamiento aditivo) de acuerdo a la situación. Aunque los dos efectos suelen neutralizarse, cuando la contaminación es elevada se sobrepone a la merma por agotamiento del antiespumante.
Sodio (Na)	Contaminación con agua de mar, mezcla con grasas sódicas, polvo o tierra. Se encuentra presente en ciertos anticongelantes (glicol). Tiende a aumentar cuando se incrementa la contaminación.
Bario (Ba)	En algunas grasas y en ciertos aditivos (detergentes) de motor. Aumenta o disminuye según la aplicación y el tipo de lubricante.
Titanio (Ti)	En rodamientos especiales (según aplicación), álabes de turbinas, rotores de compresor, resortes y restos de recubrimiento o pinturas. El aumento de concentración denota degradación o desgaste.
Vanadio (V)	Elemento característico y presente en válvulas. Su incremento manifiesta desgaste.
Potasio (K)	Presente en algunos anticongelantes. Su presencia es indicio de contaminación con esa sustancia. Polvo atmosférico y agua de mar.
Hierro (Fe)	Elemento mayoritario en mecanismos. Su aumento siempre está relacionado a un desgaste o deterioro del equipo.
Cobre (Cu)	Forma parte de cojinetes, intercambiadores de calor, aleaciones de latón. En ocasiones está presente en aditivos AD. Su incremento manifiesta mayormente desgaste.
Cromo (Cr)	En revestimientos duros, aceros inoxidables y piezas cromadas. Su crecimiento denota deterioro localizado en alguna parte de la máquina que lo contenga.
Molibdeno (Mo)	Es un aditivo de suspensión sólida pero está presente también en aleaciones (aros). Su consumo o aumento dependerá del tipo de lubricante y el contexto operativo de la máquina.
Plata (Ag)	Presente en ciertas aleaciones de componentes de grandes motores y asientos de válvulas de ciertos sistemas hidráulicos. Su aumento, aunque leve, define el nivel de desgaste.
Plomo (Pb)	Se encuentra presente en compuestos de Babbitt (recubrimiento de cojinetes). Su incremento indicaría desgaste.
Estaño (Sn)	Presente en compuestos de Babbitt. Su concentración manifiesta desgaste en partes componentes.
Niquel (Ni)	Común en aleaciones de acero inoxidable y cromados duros. Su presencia manifiesta desgaste de las partes componentes que contengan este elemento.
Aluminio (Al)	Componentes de ciertos rodamientos, cojinetes, pistones, impulsores, pinturas y recubrimientos; también presente en algunos polvos atmosféricos contaminantes. Su aumento manifestaría desgaste o contaminación.

Tabla 4.4.8
Guía para el acercamiento a fallas sintomáticas por concentración de elementos.

4.4.7 Parámetros Específicos de Diagnóstico

En el curso de este tópico se agrupan, por clase de lubricante, los parámetros útiles para un diagnóstico proactivo. Recalcamos la importancia del contexto operativo tanto en la elección de las variables como en la fijación y ajuste de los límites (alerta y alarma). Se recomienda utilizar las siguientes cuatro fuentes de información:

1. **Tabla propuesta "Valores Orientativos de Alerta y Alarma" por Clase de Aceite.**
2. **Tabla 4.4.8 "Guía para el acercamiento a fallas sintomáticas por concentración de elementos".**
3. **Los valores nominales del aceite sin uso (por análisis de laboratorio), metalurgia del equipo y contexto operativo.**
4. **Datos de las hojas técnicas del fabricante (de manera referencial).**

Para obtener buenos resultados con un plan de mantenimiento proactivo, además de establecer y monitorear los parámetros sensibles (evaluación absoluta), es recomendable estudiar la **velocidad de cambio** de estas magnitudes (evaluación relativa). Vale decir que, más allá de no haberse alcanzado un valor peligroso, la variable en cuestión puede demostrar un crecimiento acelerado que alerte sobre la gestación de alguna falla sintomática grave.

Aceites para motores de combustión

Todo lubricante tiene características particulares para satisfacer las funciones del tribosistema y un aceite para motor de combustión, no es la excepción. Los motores modernos han evolucionado de manera significativa en varios aspectos. Se logró mayor potencia, menor consumo de combustible, menor contaminación y mayor confiabilidad y disponibilidad. El mayor aporte a estas mejoras de prestación se debe a la evolución de los lubricantes.

El índice de viscosidad alcanzado por los aceites *multigrados* ha minimizado el desgaste durante el arranque. Un motor con aceite SAE 40 (monogrado) arranca en frío con una viscosidad aproximada de 150 cSt. Aunque la presión de aceite indicada por el manómetro acuse valores elevados, no es indicio de "mejor" lubricación. El instrumento sólo mide la presión de aceite en cierto punto de control e indica el funcionamiento de la bomba, pero no brinda información sobre la presión a la que está sometida la película lubricante en todas las partes. Durante un arranque puede ocurrir que, aún con buena presión, el aceite tarde en llegar a los lugares más alejados. Si se midiese el tiempo en que ciertas partes funcionan prácticamente sin lubricante, y se multiplicase por la suma total de arranques, el resultado sería una cantidad alarmante de horas en que ciertos mecanismos operan sin lubricación. Este efecto se redujo sustancialmente con el aporte de los aceites multigrados que mejoran la llegada a todos los elementos del motor por su menor viscosidad en frío. Esta es una de las razones por las que la vida de los motores es hoy bastante superior que en el pasado. Un aceite multigrado es menos viscoso a baja temperatura pero sostiene mejor la viscosidad a alta temperatura si se lo compara con un monogrado.

Otra función relevante a satisfacer por un lubricante de cárter, es la dispersancia. Los aditivos dispersantes mantienen en suspensión partículas de hollín, carbón y polvo ambiental para luego depositarlas en el filtro. Un aceite con baja capacidad dispersante se mostrará *limpio* después de unos cuantos kilómetros. Por el contrario, si su aspecto es oscuro o ennegrecido se habrá ensuciado para mantener limpio el motor. *Un aceite sucio, es un motor limpio.*

El aceite está sometido a agitación permanente con la consecuente formación de espuma. Los aditivos antiespuma minimizan las consecuencias del aire (oxidación / falla de película / cavitación). La adición de aditivos *extra* no beneficia al motor, pues todos los lubricantes se formulan con el balance justo de aditivos acorde para cada aplicación.

Motores Diesel

La relación de compresión en un motor diesel es mayor que en los motores de ciclo Otto, y la mayor temperatura de operación (referida a las zonas de exigencia del motor) hace que exista más tendencia a la oxidación y degradación del lubricante (aumento de viscosidad, depósitos y formación de barniz). Un lubricante de alto rendimiento clasificado como CF-4 por API *(American Petroleum Institute)*, otorga suficiente protección para condiciones severas de operación (intermitencia de velocidad, alta carga, ambiente contaminante, amplio rango de temperatura, etc.).

El gas-oil juega un papel fundamental en las propiedades del lubricante. Por un lado tiene un alto porcentaje de azufre, lo que facilita la formación de ácidos y el desgaste corrosivo. Además, por su estructura molecular, genera más acumulación de carbón y hollín durante la combustión. Por estas razones los aceites para motores diesel poseen alta reserva alcalina (TBN) para neutralizar los ácidos disueltos que atacan los cojinetes y buen poder detergente – dispersante para evitar los depósitos y, además, conducir hasta los filtros las partículas de carbón y hollín. Un funcionamiento incorrecto de los inyectores puede provocar que el combustible pase al cárter (dilución) sin haberse quemado o habiéndolo hecho parcialmente. Esto disminuye la viscosidad al principio y luego la aumenta cuando la oxidación alcanza valores elevados. La clasificación API para lubricantes usados en motores diesel se sintetiza en la tabla 4.4.9.

Clasificación API para aceites de Motores Diesel		
CA	Motores de aspiración natural (no sobrealimentados) y baja severidad de operación. Sin mayores requerimientos de desempeño.	Obsoleta
CB	Motores aspirados, alguna protección AD y detergente. Mediana severidad y que usan combustibles de calidad inferior (mayor contenido de azufre).	Obsoleta
CC	Levemente sobrealimentados de vieja tecnología. Exigencia media de severidad. Aceptable control sobre la formación de depósitos (barniz) y contra la corrosión.	Obsoleta
CD	Motores sobrealimentados de mayor severidad que utilizan cualquier tipo de combustible.	Obsoleta
CD-II	Motores de dos tiempos, muy buenas propiedades AD y dispersante.	Obsoleta
CE	Motores de alta performance sobrealimentados que operan en condiciones severas y alternas de carga y velocidad. Buen control sobre lodos, contaminación y desgaste.	Obsoleta
CF	Motores aspirados, turbo o sobrealimentados, de inyección indirecta. Formulados para utilizar combustibles con alto contenido de azufre (> 0,5%).	Vigente
CF-2	Motores de dos tiempos de aspiración natural o sobrealimentados. Efectivo control del desgaste en aros y cilindros. Reemplaza al nivel CD II.	Vigente
CF-4	Motores de cuatro tiempos sobrealimentados de severa condición de servicio. Motores para servicio pesado (camiones). Reemplaza al nivel CE.	Vigente
CG-4	Motores para servicios severos (urbano o ruta). Combustibles con bajo contenido de azufre(< 0,5%). Buena protección contra depósitos de alta temperatura. Muy buenas propiedades anticorrosivo, AD y antiespumante.	Vigente
CH-4	Motores de servicio severo, para uso de combustibles con alto o bajo contenido de azufre que satisfacen las normas internacionales sobre emisión. Excelente control de depósitos, desgaste y corrosión. Control de contaminantes ambientales y hollín (alta dispersancia).	Vigente
CI-4	Motores de cuatro tiempos de alta exigencia de funcionamiento. Satisfacen los últimos estándares sobre emisión de gases y control de consumo. Para combustibles con hasta el 0,05% de azufre disuelto. Excelente propiedades AD, dispersante, estabilidad a alta y bajas temperaturas de operación. Superan en rendimiento a los clase CH-4, CG-4 y CF-4.	Vigente

Tabla 4.4.9 Breve descripción de la Clasificación API para aceites de motores Diesel.

Motores Nafteros

Los motores nafteros (ciclo Otto) tienen la particularidad de operar alternadamente a baja y alta temperatura (ciudad / ruta). El servicio de baja temperatura (urbano) tiende a generar carbón, lodos y barnices. Contrariamente, la operación en ruta incrementa la viscosidad y la producción de ácidos. Al igual que para los motores diesel (aunque en menor proporción), los lubricantes se formulan con aditivos detergentes y dispersantes capaces de combatir los contaminantes. El momento en que deberían ser eliminados todos los contaminantes es durante la sustitución de la carga lubricante.

Siendo que los motores modernos (buscando mayor eficiencia y menor contaminación) se diseñan para trabajar con mezcla pobre (menos combustible y más oxígeno), se produce una mayor temperatura de combustión que acelera la oxidación del aceite y genera productos de oxidación.

Motores a GNC

Los vehículos que utilizan gas natural comprimido como combustible requieren condiciones particulares de lubricación. El aceite debe reducir los efectos de los óxidos de nitrógeno. El GNC contiene, en mayor proporción, metano como hidrocarburo. Los motores que funcionan a GNC y Nafta (alternadamente) no obtienen la máxima eficiencia con el gas, pues la relación de compresión tolerada por la nafta es menor que la admitida por el GNC (éste último tiene un mayor poder antidetonante). Parte de la energía presente en el gas se desperdicia. Para compensar este efecto se adelanta el grado de avance del encendido, aunque no en la medida óptima necesaria para el gas porque podría provocar

daños cuando el motor operara con nafta (vibración o *pistoneo* de alta frecuencia). Este adelanto parcial en el grado de avance provoca que el motor funcione a una temperatura levemente superior a la que lo haría con nafta, acelerando el proceso de oxidación del lubricante. Sin embargo, desde el punto de vista de la combustión, el GNC genera menos depósitos en la cámara de combustión y en la zona de aros. El gas contiene menos azufre que la nafta, compensándose de alguna manera los problemas por desgaste corrosivo. El aceite sufre menos dilución (mayor sostenimiento de la viscosidad por esta causa) con el uso de GNC.

Mantenimiento Proactivo

El monitoreo **periódico** proactivo se justifica en aquellos casos que la relación costo-beneficio así lo amerite. La sustitución periódica no representa, casi en ningún caso, un valor significativo respecto a los gastos de operación (y mucho menos el reemplazo de los filtros). No obstante, siempre resulta conveniente un monitoreo **discrecional** para evaluar las condiciones de operación y desgaste del motor[1]. Las fallas sintomáticas de muchos componentes con consecuencias graves para el motor, no pueden ser corregidas con el reemplazo del lubricante. De no detectarse a tiempo, estas fallas se tornan irreversibles (excepto restauración programada).

Los principales elementos a monitorear en un motor diesel son glicol, dilución por combustible, carga de hollín, agua y contaminantes atmosféricos[2]. El glicol puede contaminar el aceite a través de juntas y sellos dañados, o fisuras en los cilindros. El glicol es más aglutinante que el agua sobre las partículas de hollín, por lo que genera lodos y depósitos espesos. Además, agota los aditivos AD y antioxidantes.

Los graves problemas por dilución de combustible se generan por modos de falla en los inyectores, fugas (blow-by) o mala combustión. El combustible diluido en el aceite diluye el paquete de aditivos afectando su eficacia. Lava al aceite en camisas de cilindros acelerando el desgaste abrasivo. El seguimiento de los contaminantes atmosféricos permite evaluar la eficiencia filtrante del sistema y es una de las variables más *proactiva* del análisis. Además de los parámetros generales, sobresalen las siguientes variables de monitoreo.

Glicol, Agua y Combustible
TBN (ASTM D 5984)
Contaminantes atmosféricos
Insolubles en Pentano (ASTM D 893)
Cenizas sulfatadas (ASTM D 874)
Concentración de elementos y análisis de partículas

Posible origen de los elementos presentes en el aceite

Hierro (Fe): Camisas, levas, cigüeñal, cilindros, cadenas, etc.
Cobre (Cu): Metales de biela y cigüeñal, bujes (perno, levas, bomba)
Aluminio (Al): Pistones, metales cojinetes, etc.
Cromo (Cr): Camisas de cilindro, aros, levas, válvulas.
Estaño (Sn): Bujes y cojinetes.
Plomo (Pb): Metales de biela y bancada.
Titanio (Ti): Resortes, pinturas.
Vanadio (V): Válvulas.
Silicio (Si): Aditivos antiespumantes, polvo atmosférico por falla de filtros.
Sodio (Na): Anticongelante y polvo atmosférico.
Calcio (Ca): Aditivos y polvo atmosférico.

NOTA: Tanto en la tabla 4.4.10 como en las otras correspondientes a los próximos tipos de lubricantes, los valores de Alerta y Alarma (absolutos o relativos) son sólo orientativos. Resulta necesario, en todos los casos, ajustarlos con el estudio metalúrgico y tribológico de cada máquina. Tener en cuenta, además, que si un valor relativo se indica como +0,4 significa que se llegará al límite de Alerta o Alarma cuando el parámetro se incremente en 0,4 respecto al valor del aceite nuevo. Por el contrario, cuando el valor sugerido es 0,4, el límite absoluto tolerado para dicha magnitud es 0,4.

Los parámetros del aceite sin uso es recomendable obtenerlos a través de análisis de laboratorio.

---

1 Ver punto 3.1.5 "Frecuencia de las Tareas Condicionales", Capítulo 3.

2 James Fitch, Noria Corporation, "Cuatro contaminantes letales para el motor diesel". Revista Machinery Lubrication en Español. Agosto - Septiembre 2007.

Aceites para Motores Diesel				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 10%	+ 10% ; - 20%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 10% ; - 5%	+ 20% ; - 15%
Indice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 10%	- 15%
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	- 10%	- 15%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,4	+ 1
Basicidad (TBN)	ASTM D 5984	mgKOH/g	- 40%	- 55%
Insolubles en Pentano	ASTM D 893	% peso	3	5
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	% peso	3	4
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2b	2d
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 20% ; - 40%	+ 30% ; - 60%
Zinc (Zn)		ppm	+ 50%; - 40%	+ 100%; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 20% ; - 40%	+ 30% ; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	50	100
Cobre (Cu)		ppm	15	30
Cromo (Cr)		ppm	10	20
Molibdeno (Mo)		ppm	4	8
Plomo (Pb)		ppm	15	30
Estaño (Sn)		ppm	4	8
Niquel (Ni)		ppm	5	10
Plata (Ag)		ppm	3	6
Aluminio (Al)		ppm	10	25
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95	%vol	0,3	0,6
Dilución	ASTM D 322	%vol	3	5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	40	80
Potasio (K)		ppm	50	100
Bario (Ba)		ppm	25	50
Titanio (Ti)		ppm	5	10
Vanadio (V)		ppm	10	20

Tabla 4.4.10 Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Motores Diesel.

Aceites para transmisión a engranajes

La selección de un buen lubricante conserva las propiedades mecánicas de los sistemas de transmisión. El aceite debe reducir el desgaste logrando buena adherencia sobre los dientes. La viscosidad y los agentes de oleosidad contribuyen con esta función adhiriéndose a las superficies y minimizando el contacto entre ellas, principalmente en engranajes con velocidad de rotación baja. El aceite debe prevenir la corrosión que se origina cuando hay presencia de agua disuelta como contaminante. El desgaste por corrosión es muy perjudicial en cajas reductoras, y un cuidado especial merecen los aceites sintéticos PAG's porque son miscibles con el agua.

Ciertos aditivos EP, con compuestos de azufre – fósforo, son químicamente agresivos y facilitan la corrosión de las superficies. Una forma de corrosión localizada es el pitting (picado), caracterizado por pequeños agujeros o improntas en el metal cuyos efectos, a largo plazo, son peligrosos y dañinos. La actividad de los EP debe estar balanceada para que la prevención del desgaste no produzca excesivo desgaste por corrosión química. Algunos lubricantes de concepción muy antigua se formulaban usando base asfáltica diluida con aceite mineral o solvente, y se aplicaban casi exclusivamente para engranajes abiertos.

Entre los lubricantes sintéticos se encuentran los PAO's (Polialfaolefinas), Polibutenos o PAG's (Poliglicoles). Son apropiados para operaciones con mayor rango de temperatura debido a su elevado índice de viscosidad (IV). Una precaución importante a tener en cuenta para estos compuestos, es que deben evitar el ataque químico sobre componentes no metálicos como sellos, juntas, retenes, etc.

Los aditivos tienen que neutralizar los efectos producidos por el aire incorporado por al giro de los engranajes (batido de aceite). Los aceites se entregan terminados con antiespumantes especialmente formulados a base de siliconas. Para el caso de engranajes abiertos se adicionan aditivos sólidos en suspensión como el grafito y el bisulfuro de molibdeno (MOS_2). Actúan mecánicamente dada su forma cristalina de escamas. Se utilizan en grasas para corona – piñón. El bisulfuro de molibdeno se adiciona en lubricantes líquidos. Las suspensiones coloidales de MOS_2 tienen la propiedad de depositarse en las rugosidades superficiales del metal aumentando la suavidad.

Elección del lubricante adecuado

La viscosidad óptima para un sistema de engranajes, depende de[1]:

√ Potencia transmitida
√ Reducciones múltiples o simples (evaluar la viscosidad necesaria para cada tren)
√ Velocidad en rpm de todas la partes (etapas)
√ Tipo de lubricación (circulación forzada o salpicado)

Mantenimiento Proactivo

Además de los parámetros generales de diagnóstico (punto 4.4.6.7), podrá ser útil monitorear:

Tendencia a la espumación (ASTM D 892) para algunos tipos de reductores
Vida útil remanente (RBOT) (ASTM D 2272)
TAN (ASTM D 664)
Elementos de desgaste
Timken (ASTM D 2782), principalmente para la especificación de aceites nuevos / Ensayo de soldadura o 4 bolas (ASTM D 2266)
Conteo de partículas (ISO 4406)

Posible origen de los elementos presentes en el aceite

Hierro (Fe): Engranajes, caja, rodamientos, bombas de lubricación.
Cobre (Cu): Jaulas de rodamientos, separadores o enfriadores de aceite.
Aluminio (Al): Bombas de lubricación, separadores.
Cromo (Cr): Algunos tipos de rodamientos y piezas cromadas.
Titanio (Ti): Pinturas y ciertos revestimientos.
Silicio (Si): Aditivos antiespumantes e ingreso de polvo.
Sodio (Na): Aditivos y anticongelante.
Calcio (Ca): Aditivos e ingreso de polvo ambiental.

Aceites de Transmisión				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 10%	+ 10% ; - 15%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 10% ; - 5%	+ 15% ; - 10%
Indice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 8%	- 15%
Densidad a 15 °C	ASTM D 1298	g/ml	+ 5% ; - 8%	+ 8% ; - 12%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,4	+ 1,2
Potencial ácido (pH)	--	--	5	4
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	+ 0,6	+ 1,2
Color	ASTM D 1500	--	4	5,5
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2c	2e
Vida útil remanente (RBOT)	ASTM D 2272	%	50	35
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 50%	+ 100%
Zinc (Zn)		ppm	+ 100%; - 40%	+ 150%; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 100%; - 40%	+ 150%; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	40	80
Cobre (Cu)		ppm	15	25
Cromo (Cr)		ppm	5	10
Molibdeno (Mo)		ppm	4	8
Plomo (Pb)		ppm	5	10
Estaño (Sn)		ppm	4	8
Niquel (Ni)		ppm	3	5
Aluminio (Al)		ppm	4	8
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95 / D 6304	%vol / %p	0,15	0,2
Carbón libre	Cromatografía	%	Vestigios	0,5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	5	15
Bario (Ba)		ppm	5	10
Titanio (Ti)		ppm	2	4
Vanadio (V)		ppm	2	4
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	2500-5000	10000-20000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	640-1300	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	160-320	320-640
Código ISO 4406		--	20/18/16	21/19/17

Tabla 4.4.11 Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Transmisión.

1 Ver Anexo V, "Clasificación AGMA para lubricantes de transmisión".

Aceites para turbinas

Dentro de las funciones primordiales de una turbina para generación de energía, se encuentra la lubricación de los mecanismos vitales para su operación como cojinetes y eje. Para ello se utilizan lubricantes (mayormente minerales, no aromáticos y de baja viscosidad) con especificaciones particulares de viscosidad, limpieza y estabilidad a la oxidación. El sistema de lubricación es forzado y filtrado de manera permanente. El volumen de aceite es grande, por lo que se requieren bajas frecuencias de sustitución (sostenimiento de todas sus propiedades durante largos periodos de tiempo). El nivel de limpieza ISO (concentración de partículas) es un requerimiento importante para proteger las superficies metálicas (Babbitt) de la fricción. Además de evitar el desgaste (abrasivo y corrosivo), el lubricante debe refrigerar los elementos en movimiento con los que entra en contacto. Los contaminantes a enfrentar en este contexto operativo son la temperatura (generada por la fricción), el aire (incorporado por la recirculación permanente) y el agua (en condensados de turbinas de vapor y en sistemas de enfriamiento). Estos tres factores, como ya se mencionó, son causales de la oxidación de la base lubricante.

Los valores típicos de viscosidad son ISO 32, 46 y 68 (en ocasiones ISO 100) y los aceites se formulan con aditivos antioxidantes, inhibidores de corrosión, antiespuma y agentes de demulsificación en cantidades no mayores al 5%. Ciertos aditivos reducen la capacidad del aceite de separar el agua (poder demulsificante). Por esta razón, la cantidad total de aditivos nunca supera el valor referido. Se evitan los compuestos de base metálica como el ZDDP.

Para evaluar el comportamiento de los antioxidantes, téngase en cuenta el gráfico de la figura 4.4.13 que muestra la variación del índice de acidez en función de las horas de uso.

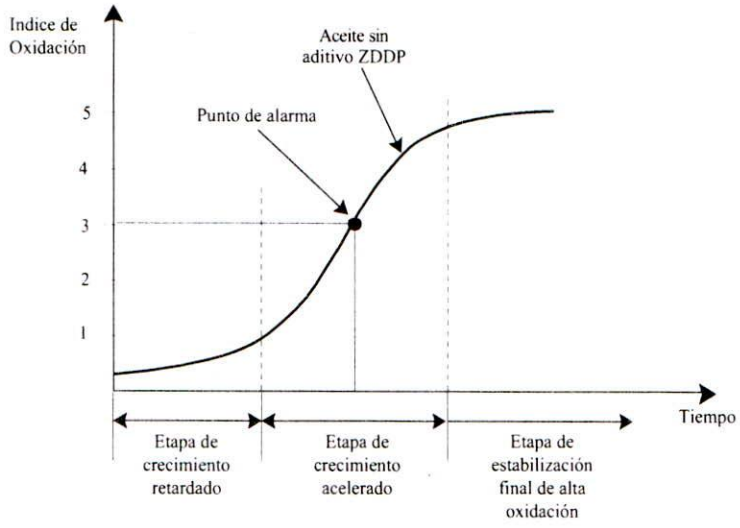


Figura 4.4.13 Evolución del índice de oxidación en un aceite de turbina.

En la primera etapa, los aditivos antioxidantes y la propia capacidad del aceite base, controlan y mantienen los niveles de oxidación debajo de valores seguros retardando su inicio. En la segunda etapa (propagación), entran en juego efectivamente los antioxidantes hasta claudicar en su punto de agotamiento (oxidación severa). A partir de allí, el aditivo se agota completamente y la oxidación, aunque elevada, se estabiliza y resulta imprescindible el reemplazo del aceite.

Mantenimiento Proactivo

Estos aceites pierden su capacidad funcional antes de su periodo de vida útil consistente, cuando el inhibidor de oxidación se agota prematuramente. Son de vigilancia frecuente los parámetros que se listan a continuación:

Punto de inflamación (ASTM D 92)
Estabilidad a la oxidación / Vida útil remanente (RBOT) (ASTM D 2272)
Poder Demulsificante (ASTM D 1401)

Demulsibilidad (ASTM D 2711), para valores de oxidación mayor a 2.
Oxidación (TOST) (ASTM D 943), no muy utilizada para aceites en uso
Antiherrumbre (ASTM D 665)
Tendencia a la espumación (ASTM D 892)
Conteo de partículas (ISO 4406)

Posible origen de los elementos presentes en el aceite

Hierro (Fe): Mecanismos, engranajes, sistemas de recirculación de aceite, rodamientos, etc.
Cobre (Cu): Cojinetes (Babbitt), separadores o circuitos de enfriamiento.
Aluminio (Al): Cojinetes, bombas de lubricación, etc.
Cromo (Cr): Piezas cromadas, si las hubiera.
Plomo (Pb): Cojinetes.
Estaño (Sn): Cojinetes (Babbitt).
Silicio (Si): Aditivos antiespumantes e ingreso de polvo, tierra.
Sodio (Na): Polvo atmosférico.
Calcio (Ca): Aditivos e ingreso de polvo ambiental.

Aceites para Turbinas				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 20 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 5%	+ 10% ; - 10%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 5%	+ 10% ; - 10%
Viscosidad a 50 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 5%	+ 10% ; - 10%
Indice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	-10%	- 15%
Punto de inflamación	ASTM D 92	°C	- 5%	- 10%
Acidez (TAN)	ASTM D 664 / D 974	mgKOH/g	+ 0,3	+ 0,8
Potencial ácido (pH)	--	--	5,5	5
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	0,4	0,8
Color	ASTM D 1500	--	3	4,5
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2a	2c
Demulsibilidad	ASTM D 1401	min	+ 20%	+ 30%
Espumación (Secuencia 1, 2 y 3)	ASTM D 892	ml	- 10%	- 20%
Antiherrumbre	ASTM D 665	--	No Pasa	--
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	% peso	0,5	1
Vida útil remanente (RBOT)	ASTM D 2272	%	60	40
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 40% ; - 40%	+ 60% ; - 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 50%; - 40%	+ 100%; - 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	20	30
Cobre (Cu)		ppm	5	15
Cromo (Cr)		ppm	2	4
Plomo (Pb)		ppm	3	6
Estaño (Sn)		ppm	3	6
Niquel (Ni)		ppm	1	2
Aluminio (Al)		ppm	2	4
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95 / D 6304	%vol / %p	0,075	0,15
Carbón libre	Cromatografía	%	Vestigios	0,5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	5	10
Bario (Ba)		ppm	5	10
Titanio (Ti)		ppm	4	8
Vanadio (V)		ppm	4	8
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	2500-5000	5000-10000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	320-640	640-1300
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	40-80	160-320
Código ISO 4406		--	19/17/15	20/18/16

Tabla 4.4.12
Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Turbina.

Como instrumento alternativo de **monitoreo continuo** pueden utilizarse detectores electrónicos de partículas ferrosas. Son sensores que identifican partículas ferrosas mayores a 200 µm e indican su presencia a través de alarmas visuales y/o sonoras.

Aceites para compresores

Las necesidades operativas y los niveles actuales de producción, han desencadenado en la construcción de distintos tipos de compresores estacionarios. Los aceites para lubricar dichas máquinas se adaptaron a tales circunstancias reduciendo el desgaste, la corrosión y el riesgo de explosión.

Cualquiera sea el tipo de compresor (de desplazamiento positivo o cinemático), tendrá que ser lubricado adecuadamente. En los compresores reciprocantes el aceite entra en contacto con el aire a alta temperatura y puede provocar acumulación de depósitos de carbón con el consecuente pegado de válvulas, acelerando el proceso de oxidación del aceite y generando lacas y residuos de carbón en los mecanismos. Además, siendo el aire un vehículo para transportar contaminantes (agua, polvo, etc.), el aceite debe reducir y combatir eficazmente estos factores externos de contaminación.

Para minimizar tales consecuencias, los lubricantes contienen detergentes y dispersantes que le confieren un bajo nivel de carbonización (Residuo Carbonoso). Otro factor importante a minimizar por los aditivos, es la formación de herrumbre. El óxido de hierro (presente en las deposiciones carbonosas) incrementa las posibilidades de explosión. El flujo continuo de aire que generan los compresores a tornillo, obliga al aceite a resolver la situación de un contacto permanente con este gas. Los compresores radiales o centrífugos se lubrican con aceites inhibidos básicamente contra la oxidación, aunque también cuentan con aditivos antiespuma, antiherrumbre y, en ocasiones, antidesgaste. Son de baja viscosidad (por la alta velocidad que alcanzan los mecanismos) y no entran en contacto con el aire comprimido. En el interior de los intercambiadores de calor de los compresores de gas natural pueden formarse depósitos de carbón y disminuir la transferencia de calor al medio refrigerante (aire), lo cual aumenta el riesgo de explosión.

Los aceites sintéticos constituyen una buena alternativa en muchos casos, por su capacidad natural antidesgaste y su mínima tendencia a la oxidación y carbonización. Además, brindan seguridad de funcionamiento por su baja evaporación y alta temperatura de autoignición. Permiten intervalos de sustitución más prolongados en situaciones donde la temperatura de descarga de los gases comprimidos excede los límites normales (160 °C).

Mantenimiento Proactivo

Para asegurar todas sus funciones, deben controlarse de manera frecuente en el aceite, los siguientes parámetros:

Viscosidad (ASTM D 445)
Antiherrumbre (ASTM D 665)
Cenizas sulfatadas (ASTM D 874)
Residuo carbonoso - Conradson (ASTM D 189)
Temperatura de autoignición (ASTM D 2155), para aceites sin uso
Agua (ASTM D 1533)
Conteo de partículas (ISO 4406)

Posible origen de los elementos presentes en el aceite

Hierro (Fe): Mecanismos, camisas, cilindros, sistemas de recirculación de aceite, etc.
Cobre (Cu): Metales, cojinetes, pernos, separadores.
Aluminio (Al): Pistones, cojinetes.
Cromo (Cr): Camisas de cilindro, aros, levas.
Plomo (Pb): Cojinetes.
Estaño (Sn): Bujes y cojinetes.
Silicio (Si): Aditivos antiespumantes, polvo atmosférico, tierra, falla de filtros.
Sodio (Na): Polvo atmosférico, falla de filtros.
Calcio (Ca): Aditivos e ingreso de polvo ambiental (falla de filtros).

Aceites para Compresores				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 10%	+ 10% ; - 15%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 10% ; - 5%	+ 15% ; - 10%
Indice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 10%	- 15%
Punto de inflamación	ASTM D92	°C	- 5%	- 10%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,3	+ 0,8
Potencial ácido (pH)	--	--	5,5	5
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	0,3	0,5
Autoignición	ASTM D 2155	°C	- 5%	- 10%
Antiherrumbre	ASTM D 665	--	No Pasa	--
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	%	0,5	1
Color	ASTM D 1500	--	3,5	4,5
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2a	2c
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 30% ; - 40%	+ 40% ; - 60%
Zinc (Zn)		ppm	+ 100%; - 40%	+ 150%; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 50%; - 40%	+ 100%; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	25	50
Cobre (Cu)		ppm	20	40
Cromo (Cr)		ppm	10	20
Molibdeno (Mo)		ppm	10	20
Plomo (Pb)		ppm	10	20
Estaño (Sn)		ppm	4	8
Niquel (Ni)		ppm	5	10
Plata (Ag)		ppm	3	6
Aluminio (Al)		ppm	10	20
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95	%vol	0,1	0,2
Carbón libre	Cromatografía	%	Vestigios	0,5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	30	60
Bario (Ba)		ppm	15	30
Titanio (Ti)		ppm	5	10
Vanadio (V)		ppm	10	20
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	5000-10000	10000-20000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	1300-2500	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	320-640	640-1300
Código ISO 4406		--	20/18/16	21/19/17

Tabla 4.4.13 Valores de Alerta y Alarma para Aceites de Compresores.

Aceites para compresores frigoríficos

Los aceites de uso frigorífico funcionan en un contexto operativo particular. Están sujetos a grandes cambios de temperatura y, normalmente, entran en contacto con los gases que ocupan el circuito de frío en distintas condiciones de presión y temperatura. Se requiere que la vida operativa sea muy prolongada, incluso en ciertos compresores debe llegar a las 45.000 horas de servicio. Los lubricantes seleccionados deben prevenir la formación de depósitos en los cilindros, condensador, válvulas de expansión y evaporadores.

El listado siguiente resume sus principales funciones.

√ Lubricar cilindros, cojinetes y válvulas del compresor.
√ Disipar el calor generado por los mecanismos.
√ Actuar de barrera para evitar el ingreso de contaminantes.
√ Sellar el gas comprimido entre aspiración y descarga.
√ Evitar el desgaste y la corrosión.

Dentro de los aceites minerales se prefieren los nafténicos porque ofrecen un menor punto de congelación. Tienen la desventaja de contar con un menor índice de viscosidad (IV) que los parafínicos.

En lo que respecta a la gama de los sintéticos, se opta por los alquibencenos porque ofrecen alta solubilidad a los gases y presentan un bajo punto de congelación. Incluso algunos aceites se producen con la capacidad de ser miscibles con los refrigerantes (líquidos) usados en el proceso frigorífico, cuyas temperaturas llegan hasta los -40 °C. Los aditivos antioxidantes deben tolerar los cambios térmicos y los antiespumantes reducir la espuma producida cuando el gas comprimido disuelto en el aceite se expande bruscamente.

Se formulan, también, con depresores del punto de congelación para neutralizar la cristalización de las partes parafínicas a bajas temperaturas.

Mantenimiento Proactivo

Tal como fue mencionado oportunamente, analizar un aceite frigorífico en uso, permite no sólo conocer el estado del aceite sino evaluar el funcionamiento tribológico del sistema y predecir fallas sintomáticas. Tal vez con mayor énfasis que para otros tipos de aceites, importa sobremanera el contexto operativo del compresor (ambiente, tipo de equipo, clase de refrigerante, grado de solubilidad aceite-refrigerante en el ciclo de enfriamiento, etc.). Estos datos son imprescindibles para definir correctamente los parámetros a monitorear y la magnitud de alerta y alarma en cada caso. La tabla 4.4.14 muestra sólo valores orientativos que pueden sufrir alteraciones significativas en función del contexto de operación.

El índice de acidez (TAN) sirve para identificar ácidos corrosivos (clorhídrico y fluorhídrico) originados por la degradación del refrigerante en el aceite y el índice de saponificación es una medida del grado de oxidación. Además, el aceite debe estar libre de componentes en suspensión como ceras que podrían obstruir válvulas.

Residuo Carbonoso (Conradson) (ASTM D 189)
Índice de acidez TAN (ASTM D 664)
Índice de saponificación (ASTM D 94)
Punto de congelación (ASTM D 97)
Agua (ASTM D 95) / (ASTM D 6304)

Aceites de uso Frigorífico				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 10%	+ 10% ; - 15%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 10% ; - 5%	+ 15% ; - 10%
Densidad a 15 °C	ASTM D 1298	g/ml	+ 5% ; - 8%	+ 8% ; - 12%
Indice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 10%	- 15%
Punto de Congelación	ASTM D 97	°C	+ 10%	+ 20%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,5	+ 1,2
Índice de saponificación	ASTM D 94	mgKOH/g	+ 0,4	+ 1,2
Potencial ácido (pH)	--	--	5,5	5
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	0,4	0,8
Color	ASTM D 1500	--	3	4
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2a	2c
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 30% ; - 40%	+ 40% ; - 60%
Zinc (Zn)		ppm	+ 100%; - 40%	+ 150%; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 50%; - 40%	+ 100%; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	25	50
Cobre (Cu)		ppm	20	40
Cromo (Cr)		ppm	10	20
Molibdeno (Mo)		ppm	10	20
Plomo (Pb)		ppm	10	20
Estaño (Sn)		ppm	4	8
Niquel (Ni)		ppm	5	10
Plata (Ag)		ppm	3	6
Aluminio (Al)		ppm	10	20
Contaminantes				
Agua	ASTM D 6304	ppm	300	900
Carbón libre	Cromatografía	%	Vestigios	0,5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	30	60
Bario (Ba)		ppm	15	30
Titanio (Ti)		ppm	5	10
Vanadio (V)		ppm	10	20
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	5000-10000	10000-20000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	1300-2500	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	160-320	320-640
Código ISO 4406		--	20/18/15	21/19/16

Tabla 4.4.14 Valores de Alerta y Alarma para Aceites de uso Frigorífico.

Aceites para sistemas hidráulicos

Los fluidos hidráulicos, además de transmitir potencia, protegen al sistema del que son parte. De base mineral o sintética, deben cumplir las funciones que se lista a continuación.

√ Transmitir eficientemente la potencia aplicada.
√ Evitar la corrosión y el desgaste de los servomecanismos y controlar las consecuencias producidas por el ingreso de contaminantes al sistema.
√ No dañar sellos, juntas, empaquetaduras o cualquier accesorio inherente a la instalación.
√ Reducir la tendencia a la formación de depósitos.
√ En algunos casos, ser resistentes al fuego.

Estos aceites tienen buena capacidad demulsificante para separar el agua que ingresa como contaminante. Los más utilizados son de base mineral parafínica pero con bajo contenido de hidrocarburos aromáticos que permite alcanzar índices de viscosidad (IV) superiores a 90. El paquete de aditivos está formado por antioxidantes, inhibidores de espuma, detergentes y dispersantes, anticorrosivos y depresores del punto de congelación. Estos últimos se usan para aplicaciones que requieren puntos de congelación menores a -15 C.

Los inhibidores de espuma aumentan la velocidad de ruptura de las burbujas. Las burbujas ocluidas o dispersas en el aceite, además de acelerar el proceso de oxidación, disminuyen su incompresibilidad (propiedad esencial de un aceite hidráulico). La formación de espuma se puede disminuir sustancialmente dotando al sistema de tanques de recirculación de mayor tamaño para incrementar el tiempo de residencia del aceite. La cantidad de espuma que puede tomar la bomba disminuye conforme aumenta el tamaño del depósito de retorno. Un tanque lo suficientemente grande (al menos 5 veces el caudal en minutos de la bomba) permite, además, que el aceite ceda más calor al medio, haciendo que su menor temperatura retarde el proceso de oxidación.

Los anticorrosivos se incorporan para evitar los efectos negativos del ingreso de humedad. Finalmente, los detergentes y dispersantes ayudan a eliminar los productos de la oxidación manteniéndolos en suspensión para que sean retenidos por los filtros.

Mantenimiento Proactivo

Viscosidad (ASTM D 445)
Antiherrumbre (ASTM D 665)
Índice de acidez (TAN) (ASTM D 664)
Cenizas sulfatadas (ASTM D 874)
Tendencia a la espumación (ASTM D 892)
Conteo de partículas (ISO 4406)

El código de limpieza ISO 4406 es el parámetro sensibles más proactivo en un análisis de aceite hidráulico. El grado de exigencia depende fundamentalmente de la presión de trabajo del lubricante. A mayor presión, mayor es el nivel de limpieza requerido. Estudios estadísticos de renombre han demostrado que pasando de un nivel de limpieza 18/15 a uno 17/14, se aumenta en más del 30% el MTBF (período promedio entre fallas) de la máquina, para los modos de falla de índole tribológico[1].

Posible origen de los elementos presentes en el aceite

Hierro (Fe): Piezas y mecanismos, accionamientos, sistemas de recirculación, etc.
Cobre (Cu): Ciertas aleaciones, engranajes y enfriadores.
Aluminio (Al): Cuerpo de bomba, bujes, etc.
Cromo (Cr): Cilindros, piezas cromadas y aceros inoxidables.
Níquel (Ni): Aleaciones de aceros duros.
Titanio (Ti): Pinturas y ciertos revestimientos.
Silicio (Si): Aditivos antiespumantes, polvo atmosférico, tierra, rotura de filtros.
Potasio (K): Polvo atmosférico, falla de filtros.
Sodio (Na): Polvo atmosférico, falla de filtros.
Calcio (Ca): Aditivos e ingreso de polvo ambiental (rotura de filtros).

---

1 Información obtenida del Seminario dictado por Noria - Laboratorio Dr. Lantos "Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceite", Edición 2004, en cuya mención se hace referencia a la Asociación Británica de Investigación en Hidrodinámica (BHRA).

Aceites para Sistemas Hidráulicos				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 7%	+ 10% ; - 12%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 7% ; - 5%	+ 10% ; - 10%
Indice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 8%	- 15%
Densidad a 15 °C	ASTM D 1298	g/ml	+ 5% ; - 5%	+ 8% ; - 10%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,6	+ 1,2
Punto de congelación	ASTM D 97	°C	+ 10%	+ 15%
Punto de inflamación	ASTM D 92	°C	- 5%	- 10%
Antiherrumbre	ASTM D 665	--	No Pasa	--
Espumación (Secuencia 1, 2 y 3)	ASTM D 892	ml	- 10%	-20%
Potencial ácido (pH)	--	--	5	4
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	%	0,5	1
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	0,4	0,8
Color	ASTM D 1500	--	3	4
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2c	2e
Espumación (Secuencia 1, 2 y 3)	ASTM D 892	ml	-10%	-20%
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 30% ; - 40%	+ 40% ; - 60%
Zinc (Zn)		ppm	+ 100%; - 40%	+ 150%; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 50%; - 40%	+ 100%; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	20	35
Cobre (Cu)		ppm	5	15
Cromo (Cr)		ppm	5	10
Molibdeno (Mo)		ppm	5	15
Plomo (Pb)		ppm	3	6
Estaño (Sn)		ppm	3	6
Niquel (Ni)		ppm	2	4
Plata (Ag)		ppm	3	6
Aluminio (Al)		ppm	4	8
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95 / D 6304	%vol / %p	+ 0,15%	+ 0,25%
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	5	10
Bario (Ba)		ppm	5	10
Titanio (Ti)		ppm	4	8
Vanadio (V)		ppm	4	8
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	2500-5000	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	640-1300	1300-2500
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	80-160	160-320
Código ISO 4406		--	20/18/15	20/19/16

Tabla 4.4.15 Valores de Alerta y Alarma para Aceites Hidráulicos.

Aceites para transformadores

Los transformadores de potencia son equipos clave en la distribución y provisión de energía eléctrica. Como elemento esencial para su operación utilizan aceite dieléctrico en su interior. Hay transformadores cuya capacidad de aceite llega a superar los 60 m^3. Los transformadores tienen pérdidas internas de energía que se manifiestan en forma de calor; se los provee, entonces, con sistemas de refrigeración en los cuales el aceite juega un rol protagónico. En la cuba del transformador la circulación del aceite (fluido electroaislante ó dieléctrico) puede ser forzada a través de un sistema de bombeo o, natural, por diferencia térmica. Al igual que en el caso de otros lubricantes industriales, los análisis efectuados sobre un aceite para transformador permiten evaluar las condiciones físico-químicas del fluido (identificar fallas sintomáticas en ocasiones reversibles) y poner de manifiesto fallas sintomáticas sobre el equipo (en ocasiones irreversibles). Más que en cualquier otro caso, en este tipo de análisis, un único parámetro no es suficiente para diagnosticar la causa raíz de falla. Se requiere de una evaluación **sistémica** y **relativa** de las demás variables medidas.

Dentro de las funciones principales de un aceite aislante, se destacan:

√ Mantener aislados (eléctricamente) los componentes y conductores.
√ No propagar y extinguir arcos eléctricos.
√ Extraer el calor generado en el transformador y cederlo al medio.

√ Cumplir satisfactoriamente las funciones anteriores durante periodos extensos de tiempo.

La materia prima fundamental para aceites dieléctricos de transformadores, condensadores y cables huecos, son los aceites minerales conocidos como *spindle oils* de baja viscosidad. Una de las características fundamentales es su excelente resistencia a la oxidación. Para satisfacer con éxito las funciones mencionadas, el aceite dieléctrico debe poseer las propiedades que se describen a continuación.

√ **Viscosidad**. La viscosidad debe ser baja; según la especificación IEC[1] 296, la viscosidad a 40 °C no debe superar los 16,5 cSt. Una baja viscosidad facilita la circulación del aceite (por convección) y aumenta la transferencia de calor al medio.

√ **Rigidez dieléctrica ó Tensión de perforación**. Es la tensión a la cual el aceite permite la formación de un arco eléctrico. Indica el poder dieléctrico del aceite. Esta característica le confiere la capacidad de soportar las severas solicitaciones eléctricas del servicio.
La capacidad de un aceite para absorber cierto volumen de humedad a una determinada temperatura (higroscopía), tiene gran importancia sobre la rigidez dieléctrica. El volumen absoluto de agua soluble en el aceite es un valor constante, y el agua restante se libera en forma de emulsión disminuyendo bruscamente esta propiedad. Por este motivo, en toda especificación de un fluido aislante se establece el contenido máximo de agua tolerada.
Las partículas sólidas en suspensión y los gases disueltos también disminuyen la rigidez dieléctrica. Por el contrario, un aumento en la viscosidad la incrementa. La producción de *aislantes líquidos* busca encontrar un equilibrio de viscosidad, tanto para asegurar buena circulación por convección (baja viscosidad para disipar calor), como adecuados valores de rigidez dieléctrica que requieren mayor viscosidad.

√ **Factor de disipación ó Tangente delta (tg δ)**. Es una medida de las pérdidas por disipación eléctrica en el aceite. Los aceites dieléctricos no son aislantes puros y durante el uso se produce un ligero pasaje de corriente en su interior que eleva su temperatura. En el caso ideal, la corriente y la tensión están desfasadas 90° ($\pi/2$). En la práctica este ángulo no se alcanza rigurosamente, presentando una desviación angular llamada Delta (δ). La tangente de este ángulo se conoce como *factor de disipación* o (tg δ).
Para aceites nuevos, los valores normales rondan los 5×10^{-3}. Sin embargo, para aceites en uso puede ascender sustancialmente. La tangente delta es función de la temperatura del aceite.
Un incremento de tg δ puede obedecer a una excesiva corrosión metálica, a degradación de la celulosa (presente en el papel aislante de los bobinados) o a un proceso prematuro de oxidación en el aceite.
El monitoreo de esta propiedad adquiere relevancia en transformadores cuyo voltaje es superior a los 40 kV. Un valor elevado deteriora la aislación de los enrollados.

√ **Resistencia al envejecimiento**. Los aceites para transformador envejecen; se oxidan formando ácidos orgánicos. Dicho envejecimiento se ve acelerado por la temperatura, humedad, aire, y metales catalizadores como hierro y cobre (presentes en los internos del equipo).
Durante el mantenimiento proactivo, el envejecimiento se reconoce por el aumento del *número de neutralización* (ASTM D 974), la presencia de lodos insolubles y la alteración de la tg δ. El número de neutralización manifiesta un crecimiento del tipo parabólico en función del tiempo como ocurre con un aceite para turbinas.
El proceso de oxidación puede retardarse con la incorporación de antioxidantes (para el caso de aceites inhibidos).
La velocidad de oxidación disminuye con la disminución de la concentración de oxígeno, por tal motivo los transformadores de gran potencia se fabrican herméticos para evitar el contacto aceite-aire. Resulta necesario, también, tomar recaudos al momento del llenado o rellenado. El aceite se somete a un tratamiento de eliminación de agua (deshidratación) y de aire disuelto (desgasificación). Además, esta maniobra va acompañada de un vacío en el interior del transformador para eliminar el aire ocluido en los intersticios de la aislación sólida.

√ **Punto de congelación**. Constituye una indicación de la capacidad del aceite a fluir a bajas temperaturas. El punto de congelación o escurrimiento debe ser bajo para evitar la cristalización o espesamiento a bajas temperaturas. Esta característica se fortalece con el agregado de aditivos.

---

1 International Electrotechnical Commission. Ver Anexo IV.

Los aceites suelen clasificarse bajo dos categorías.

√ *Aceites Inhibidos*: Son aquellos que se formulan con aditivos antioxidantes para prolongar su vida útil de servicio.
√ *Aceites no Inhibidos*: Son aceites de base mineral, puros, ultra-refinados y sin ninguna clase de aditivo antioxidante (o a lo sumo muy baja concentración).

Mantenimiento Proactivo

De todos los parámetros sensibles de monitoreo ilustrados en la tabla 4.4.16, se destacan los resumidos a continuación.

Viscosidad a 40 °C (ASTM D 445).
Color (ASTM D 1500).
Contenido de Agua (ASTM D 1533). Además de un ingreso accidental, la humedad del aire puede aumentar la concentración de agua en el aceite. Esto provoca la disminución de la rigidez dieléctrica, deteriora el aislante sólido (barniz, presspan[1], madera, etc.) y aumenta el factor de disipación (tangente δ). La capacidad de un aceite para disolver agua aumenta con la temperatura. Alrededor de los 70 °C puede disolver hasta 80 ppm, mientras que a 20 °C la solubilidad disminuye al punto que sólo es capaz de asimilar entre 15 y 20 ppm.
Rigidez dieléctrica (ASTM D 1816). Su seguimiento permite realizar estimaciones indirectas acerca de las impurezas disueltas en el aceite y su contenido de agua.
Número de neutralización (TAN) (ASTM D 974 / D 664). Es un indicador del grado de envejecimiento y de la acidez orgánica. Un elevado índice de acidez ataca el barniz de los aislantes.
Tensión interfacial (ASTM D 2285 / D 971). Permite evaluar la estabilidad química del aceite dieléctrico; la presencia de moléculas ácidas disminuye la tensión interfacial. También revela posible contaminación con otro tipo de aceite industrial. Si el nivel de oxidación del aceite es elevado, la tensión interfacial cae bruscamente.
Tangente Delta (δ) [90 °C] (ASTM D 927). Es posible analizar los efectos de contaminación con agua y con elementos surgidos a consecuencia de una oxidación prematura.

De acuerdo al contenido de humedad en el aceite a distintas temperaturas, es posible evaluar indirectamente el grado de humedecimiento de la aislación sólida del transformador. El deterioro de la aislación sólida ocurre a consecuencia de la presencia de agua y ácidos. Provoca el descascaramiento del barniz, la corrosión de los componentes metálicos de hierro y cobre y las grietas en el papel.

La potencia del aceite para develar fallas sintomáticas se completa con el análisis de los **gases disueltos**. La aparición de gases en el aceite puede ser originada por falla eléctrica o recalentamiento puntual de algún elemento interno. Aplicando la cromatografía gaseosa es factible determinar la concentración de cada gas y evaluar la relación cuantitativa entre ellos. Tal relación permite, en muchos casos, identificar la falla incipiente para evitar la falla funcional del equipo. El mayor inconveniente es que ciertas concentraciones de gases pueden formar pequeñas burbujas y provocar micro explosiones internas.

Dentro de los posibles gases disueltos en un aceite de transformador, se encuentran:

Metano	CH_4
Etileno	C_2H_4
Etano	C_2H_6
Acetileno	C_2H_2
Hidrógeno	H_2
Monóxido de Carbono	CO
Dióxido de Carbono	CO_2

Técnicas como el Triángulo de Duval, permiten diagnosticar la condición del transformador en función de la relación cuantitativa de gases como el metano, etileno y acetileno.

Para evaluar el grado de deterioro de los aislantes sólidos como papel, presspan o madera, se aplica la cromatografía líquida (ASTM D 5837) que identifica la presencia o concentración de compuestos furánicos[2]. Ver tabla 4.4.16 y sus límites de alerta y alarma.

---

1 El presspan es un material aislante con base de celulosa provisto en forma de rollos de papel o cartón. Satisface la norma IEC 60641 como aislante en transformadores de aceite.
2 Noria - Laboratorio Dr. Lantos. Seminario de Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceite, Edición 2004.

Afortunadamente algunas fallas sintomáticas son reversibles. Cuando hay contaminación con agua o sólidos, puede recurrirse a una deshidratación y/o purificación. Se utilizan equipos móviles de recirculación provistos de filtros y separadores que extraen el agua y remueven las partículas. Paralelamente se sugerirá la restauración del venteo (con la sustitución de la sílica-gel®[1]). Para los aceites inhibidos contra la corrosión, y habiendo descendido la concentración del aditivo, suelen adicionarse cantidades extra de inhibidor de oxidación.

Para cualquier maniobra de recuperación y salvaguarda del aceite, se aconseja la opinión de un especialista calificado.

Aceites para Transformadores				
Parámetro Sensible	**Técnica**	**Unidad**	**Alerta**	**Alarma**
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 15%; - 4%	+ 16%; - 8%
Densidad a 15 °C	ASTM D 1298	g/ml	0,880	0,895
Rigidez dieléctrica	ASTM D 1816	KV	40	30
(TAN) Número de neutralización	ASTM D 974	mgKOH/g	0,15	0,18
Punto de inflamación	ASTM D 92	°C	140	135
Punto de congelación	ASTM D 97	°C	+ 10%	+ 15%
Tensión interfacial	ASTM D 2285 / D 971	dinas/cm	30	25
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	%	0,02	0,03
Color	ASTM D 1500	--	2	2,5
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	1b	2a
Tangente delta (δ)	ASTM D 927	--	40×10^{-3}	80×10^{-3}
Aditivos				
Inhibidor de oxidación (Aceites aditivados)	ASTM D 2668	%	0,15	0,10
Contaminantes				
Agua (Karl Fisher)	ASTM D 1533	ppm	15	20
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	2500-5000	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	640-1300	1300-2500
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	80-160	160-320
Código ISO 4406		--	19/17/14	19/18/15
Gases disueltos (*)				
Metano (CH4)	ASTM D 3612 (IEC 60599/60567)	ppm	50	100
Etileno (C2H4)		ppm	75	100
Etano (C2H6)		ppm	50	100
Acetileno (C2H2)		ppm	4	8
Hidrógeno (H2)		ppm	150	300
Monóxido de carbono (CO)		ppm	350	500
Dióxido de carbono (CO2)		ppm	3000	4000
Oxígeno (O2)		ppm	22000	30000
Nitrógeno (N2)		ppm	70000	95000
Gases combustibles		ppm	1000	2000
Gases Totales		%vol	8,5	9,5
Cromatografía líquida				
Furfural	ASTM D 5837	ppm	0,3	5
Hidroximetil furfural		ppm	0,3	5
Furfuril alcohol		ppm	0,3	5
Acetil furfural		ppm	0,3	5
Metil furfural		ppm	0,3	5

Tabla 4.4.16 Valores de Alerta y Alarma para Aceites de Transformadores.

(*) Para un diagnóstico acertado se recomienda la aplicación del método ROGERS-IEC

4.4.8 Ensayos sensoriales de campo

Existen alternativas de bajo costo para evaluar y diagnosticar la condición de un aceite de manera rápida, aunque aproximada. El aspecto general del aceite es un parámetro útil para la detección prematura de anomalías en el tribosistema. Vemos a continuación ciertos ensayos de aplicación práctica.

Nota: Las pruebas llamadas de "campo" no reemplazan los análisis de laboratorio; son ensayos complementarios para verificar el estado general de un lubricante.

Ensayo con papel secante

Consiste en verter dos gotas de aceite sobre un papel secante del tipo Whatman® y observar su apariencia final. Manteniendo el papel suspendido con la mano horizontalmente, y después de transcurridos unos minutos, el centro de la gota brinda información interesante.

1 La Silicagel® es hidróxido de sílice deshidratado que logra la adsorción de líquidos, y no resulta tóxica ni corrosiva.

- √ Un círculo negro bien definido en el centro de la mancha indica alta carga de hollín o falla del aditivo dispersante. El humo negro en la salida del escape ratificaría este diagnóstico.
- √ Cuando hay dilución por combustible, se presenta un halo de color más claro alrededor de la gota central de aceite.
- √ Manchas de herrumbre en el papel de filtro indican condición de desgaste corrosivo.
- √ La contaminación con anticongelante (glicol) manifiesta un centro negro de apariencia pastosa.
- √ Cuando la periferia de la mancha adopta una forma de estrella (patas de araña), indica la presencia de agua en el aceite.

Prueba de sedimentación

Una prueba de asentamiento permite identificar la presencia de agua y partículas (metálicas y no metálicas). La propuesta es dejar asentar la muestra en envases totalmente transparentes y, luego de dos o tres días, observar el fondo. Se coloca debajo del recipiente un imán para favorecer la deposición de las partículas. Sin embargo, las partículas muy pequeñas no decantan aún con la ayuda del imán. En el fondo se depositan principalmente las partículas metálicas más grandes (> 20 μm), y las no metálicas superiores a 50 μm. Cuanto menor es la viscosidad, menor el tiempo de deposición de las partículas.

Ensayo para partículas ferrosas[1]

Tomar una muestra y agitar fuertemente para homogeneizar todo el contenido del envase. Seguidamente, mezclar parte del aceite con querosene (u otro solvente disponible) previamente filtrado en una dilución del 10% de aceite en un frasco de fondo plano. Apoyar el envase con la muestra sobre un imán y revolver durante 2 minutos. Sin quitar el imán y después de 10 minutos, volcar la mezcla procurando que las partículas del fondo queden en el recipiente. Agregar 50 ml de querosene y filtrar con papel Whatman®. Analizar detenidamente las partículas con la ayuda de un microscopio observando tamaño, morfología, color, etc.

Al igual que para otros métodos subjetivos, cobra mucha importancia la experiencia del analista.

Inspección del color

La comparación periódica del color del aceite, es una prueba importante aunque relativa. Se pueden guardar e identificar las muestras según fecha, incluyendo la del aceite sin uso. Se evalúa de esta forma el color de cada una y se sigue su evolución a través del tiempo (ASTM D 1500).

Un oscurecimiento puede ser síntoma de oxidación (formación de ácidos), falla térmica por exceso de temperatura, agotamiento de aditivos o contaminación con sólidos. Un aspecto opaco o nebuloso podría indicar presencia de agua.

Resulta muy útil incluir la inspección de visores (por color) en las rutinas de inspección estática (RIE) como parte del mantenimiento preventivo. (Ver tabla 2.3.1 Capítulo 2).

Recordar que un aspecto lechoso del aceite indicaría agua emulsionada en más de 0,5%.

Ensayo de Crepitado

Se trata de un ensayo sencillo que permite detectar la contaminación con agua o refrigerante. Se calienta una superficie metálica (plancha metálica) a 160 °C. Luego se arrojan dos gotas de aceite y se evalúa su reacción. El *crepitado* se manifiesta como ruido a "fritura" o "chasquido". Si el chasquido es perfectamente reconocible (visible y audible) existe agua emulsionada en el aceite con una concentración mayor a 0,1%. Por su parte, un chasquido sutil o suave indica leve contaminación o vestigios de agua. La experiencia del observador es importante para este ensayo.

Prueba de olor

El sentido del olfato no es una virtud de nosotros los humanos, principalmente por el escaso desarrollo fisiológico de la *memoria* olfativa, que sí poseen otras especies. Sin embargo, y aún con nuestras limitaciones, podemos aprovechar el olor de un aceite para identificar, por comparación, posibles patologías.

---

1 La descripción de este ensayo está basada en el seminario "Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceite" dictado por Noria - Laboratorio Dr. Lantos, en 2004 Buenos Aires.

Los especialistas recomiendan comparar el olor de la muestra con otros lubricantes: *sin uso, fehacientemente oxidados, contaminados* o *quemados.*

La contaminación con algún tipo de combustible o solvente, propiciará un olor característico a ese producto. Un olor desagradable del tipo agrio (semejante a huevo podrido) puede ser indicio de contaminación con agua y crecimiento bacteriano. Olor a comida quemada indicaría falla térmica, presencia de lodos y barniz u oxidación (agotamiento de aditivos).

Inspección de filtros y trampas

Los filtros y trampas magnéticas constituyen una fuente de información valiosísima; pueden identificarse partículas ferrosas y no ferrosas. Un estudio adecuado de la forma, tipo, tamaño y cantidad aproximada de las partículas, brinda información relevante para el diagnóstico tribológico del sistema. Con suficiente experiencia se puede determinar, incluso, la fuente de generación.

Las bacterias en los filtros se reconocen como babas y olor desagradable. Una acumulación excesiva de lodos en los filtros tipo malla, puede ser indicio de altos niveles de oxidación.

4.4.9 Precauciones durante el muestreo

El muestreo es una de las operaciones más importantes en el ciclo de mantenimiento proactivo de los lubricantes industriales. La muestra debe ser extraída por personal técnicamente idóneo y garantizar dos aspectos fundamentales.

√ **Ser representativa del estado tribológico del sistema.** La muestra debe representar la totalidad del aceite circulante. Retirar muestras del fondo de un tanque o depósito no cumple este requisito pues el aceite está alterado por las condiciones propias del fondo de tanque (lodos, sedimentos, acumulación de partículas, etc.); salvo para los casos que sea necesario estudiar la composición de los sedimentos y lodos. Los especialistas de proactivo sugieren tomar muestras en: *regímenes turbulentos, zonas vivas* (máquina en funcionamiento), *antes de los filtros, después de los mecanismos lubricados,* etc. No tomar muestras en los puntos de remanso.

√ **No sufrir alteraciones durante la extracción, transporte y manipuleo.** Los elementos como mangueras, jeringas, envases, deben manipularse con precaución. Además, las botellas deben cumplir criterios de limpieza según sea el tipo de análisis. Es conveniente enviar las muestras al laboratorio con la mayor prontitud posible.

Una opción válida (tomando algunas precauciones) es usar manguera y bomba de succión. Evitar el contacto de la manguera con el fondo del depósito (mínimo 20 cm) y utilizar, en lo posible, mangueras descartables. No reutilizar la manguera para distintas aplicaciones y precintarla a una varilla limpia que la conduzca correctamente a la ubicación elegida. No usar trapos ni "estopa" para la limpieza de la varilla, botella o manguera; es preferible el papel. No se recomienda tomar muestras de aceites dieléctricos los días de lluvia o con elevada humedad ambiente.

Envases para muestreo

Utilizar envases nuevos y limpios, no reutilizarlos ni lavarlos. Nunca es conveniente llenar las botellas con más de ¾ partes porque el laboratorio pretenderá reproducir la dispersión de los elementos de la muestra por medio de agitación. La agitación (manual o automática) para homogeneizar, sólo es efectiva si la botella tiene cierto espacio libre. De lo contrario, se deberá verter parte de la muestra alterando la distribución porcentual elementos. Los materiales elegidos para los envases son el polietileno (opaco) y el PET (transparente).

4.4.10 Grasas Lubricantes

Diversas son las aplicaciones que requieren de grasa para reducir el rozamiento y preservar los elementos bajo fricción. Una grasa es un compuesto sólido o semifluido (no newtoniano[1]) formulado con un aceite base, un espesante y un conjunto de aditivos. Gracias a su consistencia, se utilizan en lugares abiertos donde resulta imposible contener un aceite. Gran variedad de rodamientos, alojamientos de ejes, cadenas, engranajes, soportes, etc., usan grasa como lubricante.

4.4.10.1 Funciones y Propiedades de las grasas

Sus funciones son similares a las mencionadas para los aceites, dentro de las que se destaca la separación de las superficies en contacto altamente cargadas. Deben tener la capacidad de:

- √ Contar con buen poder lubricante para separar las superficies en contacto (rodante o deslizante), y resistir los impactos.
- √ Resistir altas temperaturas, agua y otros contaminantes líquidos o sólidos.
- √ Mantener la consistencia y estabilidad físico-química.
- √ Proteger los mecanismos contra la corrosión y la herrumbre.
- √ Poseer buena estabilidad al almacenamiento.
- √ Mantener todas sus propiedades durante el tiempo de operación.

Sin duda la propiedad más importante de las grasas es la *consistencia*, medida a través del ensayo de penetración ASTM D-217[2]. La consistencia indica el grado de espesamiento o firmeza que tiene la grasa. La bombeabilidad (capacidad de ser transportada por acción mecánica en sistemas cerrados) se relaciona con la consistencia, a mayor consistencia menor bombeabilidad. El diseño de los sistemas centralizados de lubricación debe considerar el grado de bombeabilidad de la grasa a transportar.

La consistencia se clasifica según el código NLGI[3] y la relación con dicho ensayo se aprecia en la tabla 4.4.17. El grado de consistencia alcanzado depende exclusivamente del tipo y cantidad de espesante que contenga la grasa, y no de la viscosidad inicial del aceite base. La selección del nivel NLGI depende del contexto operativo completo; es decir, mecanismos a lubricar, método de aplicación, velocidad, temperatura de operación, nivel de contaminantes, tipo de grasa, etc.

Consistencia (Grado NLGI)	Penetración [unidades de 0,1 mm] (ASTM D 217)
000	445 a 475
00	400 a 430
0	355 a 385
1	310 a 340
2	265 a 295
3	220 a 250
4	175 a 205
5	130 a 160
6	85 a 115

Tabla 4.4.17 Relación entre la penetración del cono (ASTM D 217) y el nivel de consistencia NLGI.

4.4.10.2 Formulación y Tipos de grasas

Las grasas se componen de un aceite base (mineral o sintético), un agente espesante (que le otorga consistencia) y un paquete de aditivos adecuadamente balanceado (que le confiere propiedades particulares). Generalmente, el espesante es un jabón metálico o un gel inorgánico (alrededor del 10%) que forma una red molecular cristalina, absorbe el aceite y lo espesa. Los aditivos se incorporan para prevenir corrosión, oxidación y aumentar la resistencia a la carga.

---

1 Cuando un fluido no fluye de manera proporcional al esfuerzo que se le aplica, se denomina no newtoniano.
2 Ver Anexo IV. "Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas".
3 NLGI: National Lubricating Grease Institute.

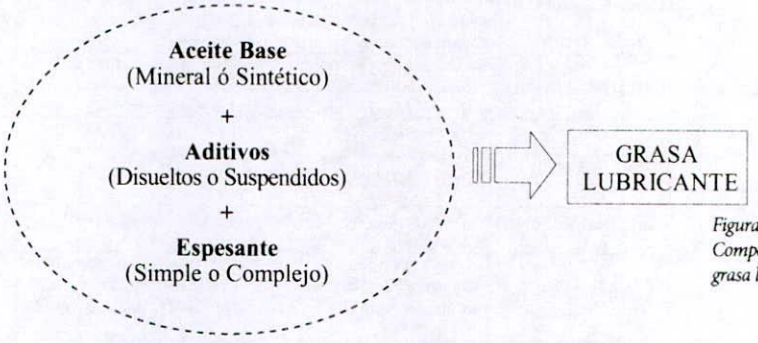


Figura 4.4.14
Componentes de una grasa lubricante.

Aceite base

La mayoría de las grasas comercialmente disponibles poseen una base mineral; no obstante, referimos los aceites más usados para constituir grasas sintéticas.

- √ *Poliglicoles (PAG).* Tienen la característica de ser estables a alta temperatura. Poseen baja resistencia al agua y pueden atacar ciertas pinturas o acabados superficiales.
- √ *Esteres orgánicos.* Alto índice de viscosidad y resistencia a bajas temperaturas. Se usan en aplicaciones con grandes cambios térmicos.
- √ *Polialfaolefinas (PAO).* Buena resistencia a la evaporación y al calor, retardan el proceso de oxidación y tienen la capacidad de operar a baja temperatura. Constituyen una matriz compatible con gran cantidad de espesantes.

Espesantes

Son compuestos que se incorporan al aceite base una vez aditivado, para lograr la consistencia deseada. Como se dijo, es una red molecular que absorbe al aceite y evita su escurrimiento. Los espesantes definen el tipo de grasa. Existen jabones metálicos simples (sodio, calcio, litio o aluminio) y espesantes llamados *compuestos* formados por una sal y un jabón metálico, bentonita, poliurea o PTFE. En general, el segundo grupo de grasas tiene el punto de goteo más alto, toleran mayores temperaturas de operación y cuentan con mejor estabilidad mecánica.

Aditivos

Se incorporan a las grasas con el mismo objetivo que el buscado en la formulación de aceites lubricantes[1]. Dentro de los más utilizados encontramos los antioxidantes, anticorrosivos y los EP (*di-alquil-ditiofosfato de zinc* y *compuestos azufre fósforo*) o antisoldantes[2]. Algunas grasas se fabrican con suspensiones sólidas de *grafito* (para altas temperaturas de operación y movimientos lentos de elevada carga) o *disulfuro de molibdeno* (MOS_2). En ambos casos la concentración no suele superar el 5%. Otras especificaciones adicionan *cobre metálico* en forma de laminillas finas para contextos de muy alta temperatura (300 °C). Recientes desarrollos para la industria alimenticia, incorporan el *teflón* debido a su alto poder lubricante y su resistencia a temperaturas elevadas.

Las combinaciones más conocidas entre los diferentes tipos de espesantes y bases, así como sus propiedades características, se resumen en la siguiente tabla.

---

1 Ver sección 4.4.5 "Aditivos".
2 Del manual "Aceites y Lubricantes Industriales" de YPF, Edición 2000.

Tipo de Grasa			Características	
Aceite Base	**Estructura**	**Tipo**	**Propiedades**	**Aplicación**
Mineral	Simple	Grasa de Calcio (Ca)	*Estructura adherente pero de regular estabilidad mecánica. No se disuelven en agua y son estables hasta con 3% de este contaminante. Bajo punto de goteo. Ciertas grasas de jabón calcio - plomo otorgan buena protección contra el agua salada.*	*Contextos en los que exista posible contaminación con agua y ambientes marinos. No recomendable para uso en rodamientos o altas temperaturas (> 60 °C).*
		Grasa de Sodio (Na)	*Más resistentes a la temperatura que las cálcicas (punto de goteo cercano a los 180 °C). Buena adherencia y protección contra la oxidación. Baja resistencia a la contaminación con agua.*	*Evitar aplicaciones húmedas; se emulsiona con el agua.*
		Grasa de Litio (Li)	*Poseen las propiedades positivas de las cálcicas y sódicas, no así las negativas. Aceptable resistencia al agua.*	*Denominadas "multipropósito", se utilizan en diversas aplicaciones y contextos (rodamientos, ejes, etc.). Rango de operación factible: de - 20 a 120 °C.*
	Compuesta	Complejo Aluminio (Al)	*Muy alto punto de goteo y muy resistentes al agua. Elevado costo de adquisición.*	*Aplicable en grasas de grado alimenticio. Rango de operación: de - 30 a 170 °C.*
		Complejo Calcio (Ca)	*Las grasas compuetas de jabón de calcio tienen excelente resistencia al agua. Su principal ingrediente es el acetato cálcico. Poseen muy alto punto de goteo, cercano a los 240 °C. Aceptable estabilidad mecánica.*	*Contextos que requieren alta resistencia al agua y ambientes marinos. Cojinetes, rodamientos, cadenas y ejes. Rango factible de utilización: de - 20 a 150 °C.*
		Complejo Bario (Ba)	*Buenas propiedades EP y alto punto de goteo.*	*Uso restringido, resistentes al vapor. Útil para rodamientos en algunos casos.*
		Complejo Litio (Li)	*Mayor punto de goteo (250 °C) que el logrado con espesantes simples de Litio. Muy buena resistencia al agua. Excelente estabilidad mecánica y resistencia al corte. Buena protección contra la herrumbre y excelentes características antidesgaste y EP. Buena bombeabilidad.*	*Para equipos de funcionamiento continuo y diversas aplicaciones y contextos industriales. Cojinetes planos, antifricción y engranajes. Rango factible: de - 20 a 160 °C. Picos de hasta 200 °C.*
		Complejo Sodio (Na)	*Elevado punto de goteo. Algunos desarrollos han alcanzado temperaturas de utilización continua de hasta 120 °C. Aceptable resistencia al agua.*	*Contextos operativos en los que es necesaria buena resistencia a la oxidación.*
	Compuesta	Bentonítica	*La bentonita organofílica (a base de arcillas y productos orgánicos) se utiliza para espesar aceites minerales de grado alimenticio. Se formulan incorporando un agente polar (alcohol metílico o acetona). Muy buena resistencia al agua.*	*En rodamientos y cojinetes con temperaturas continuas de operación de hasta 140 y 170 °C, respectivamente.*
PAO		Bentonítica	*Propiedades similares a las anteriores. Más resistentes a la temperatura, su límite de utilización está dado por su carbonización y no por su escurrimiento. Esto asegura buena lubricación hasta temperaturas de 300 °C. Son resistentes al agua. Costo elevado.*	*Amplio rango de utilización, principalmente en lo que respecta a temperatura.*
	Compuesta	Grasa de Litio (Li)	*Punto de goteo similar a las grasas de Litio de base mineral. Muy buena estabilidad mecánica, resistencia al agua y antidesgaste.*	*Diversas aplicaciones. Rodamientos, ejes, etc. Rango factible de - 50 a 160 °C. Picos de hasta 200 °C.*
	Compuesta	Piliurea	*Contienen aproximadamente un 10% de este espesante. Excelentes propiedades a bajas y altas temperaturas (punto de goteo 250 °C). Son muy estables a la oxidación y resistentes a la contaminación con agua. Excelente capacidad de carga, buenas propiedades EP y estabilidad mecánica.*	*Alta temperatura de operación y extensos periodos de funcionamiento. Situaciones de baja temperatura. Motores eléctricos, lubricaciones "de por vida" y, en algunos casos, aplicaciones grado alimenticio.*
Ester	Compuesta	Complejo Bario (Ba)	*Excelente propiedades EP y alto punto de goteo. Capacidad de trabajo a bajas temperaturas y alta velocidad de operación.*	*Útil para ciertos rodamientos de mediana y alta velocidad. Ciertas aplicación de la aviación.*
		Complejo Calcio (Ca)	*Alto punto de goteo y más resistentes a la contaminación con agua que las grasas compuestas de Bario o Litio.*	*Contextos operativos en los que se requiere buena resistencia al agua.*
		Complejo Litio (Li)	*Mayor punto de goteo y rango de temperatura de operación (hasta 180 °C). Responden adecuadamente a condiciones de alta carga, temperatura y velocidad. Buena resistencia a la contaminación con agua.*	*Amplio rango de utilización. Rodamientos, cojintes, etc.*

Tabla 4.4.18 Tipos de Grasas, propiedades y aplicaciones.

4.4.10.3 Lubricación de Rodamientos y Cadenas

Una amplia gama de rodamientos se lubrican con grasa. Esto permite intervalos prolongados entre relubricaciones y, además, diseños más sencillos. La cantidad de grasa con que debe trabajar un rodamiento es clave para su desempeño y depende de su tamaño, velocidad y tipo. Estos parámetros, inherentes al diseño y al contexto operativo, definen lo que se llama *factor de velocidad* (f_v). Para calcular el factor de velocidad se determina primero el *diámetro medio* (d_m) del rodamiento según la ecuación 4.4.6.

$$d_m = \frac{d_i + d_e}{2} \qquad 4.4.6$$

Donde d_i y d_e son el diámetro del agujero (interno) y el diámetro externo respectivamente, en milímetros. Luego, el factor de velocidad (f_v) queda definido por la ecuación 4.4.7 en la que se aprecia la influencia de la velocidad de rotación (rpm) y un factor adicional de corrección (f_c) que se obtiene de tablas disponibles para cada tipo de rodamiento. Su valor está comprendido entre 1 y 3, dependiendo del tipo de rodamiento y del fabricante.

$$f_v = d_m \times rpm \times f_C \qquad 4.4.7$$

Con f_v, y con ayuda de la tabla 4.4.19, puede estimarse la cantidad de lubricante como porcentaje del volumen libre del rodamiento. Este último valor puede obtenerse de diagramas que proveen los mismos fabricantes.

f_v	Cantidad aproximada de grasa [% volumen libre]
≤ 80.000	90%
80.000 - 350.000	30%
350.000 - 500.000	15%
> 500.000	Lubricación con aceite

Tabla 4.4.19 Porcentaje a llenar con grasa del volumen libre del rodamiento en función del factor de velocidad.

La selección del tipo de grasa apropiada para cada aplicación es fundamental para lograr un buen desempeño. El grado de consistencia más común para la lubricación manual de cojinetes antifricción es NLGI 2 EP (verificar, de todas formas, los requerimientos para cada aplicación). En tales casos, el bombeo debe ser lento para asegurar que el producto fluya dentro del alojamiento. En ningún caso se recomienda mezclar grasas; puede reaccionar la estructura espesante con el aceite base y deteriorarla completamente.

Siendo que la bombeabilidad depende de la consistencia, para aplicaciones automáticas se acostumbra el uso de números NLGI 0 y 1.

Nota: Toda relubricación requiere que la máquina se encuentre en movimiento.

Si el medio lubricante es aceite, los niveles nominales de alerta y alarma orientativos para el código de limpieza ISO 4406 en rodamientos, son los mostrados en la tabla 4.4.20.

	Nominal	Alerta	Alarma
Rodamientos de bolas	15/13/11	16/14/12	17/15/13
Rodamientos de rodillos	16/14/12	17/15/13	18/16/13

Tabla 4.4.20 Límites de alerta y alarma orientativos para el código de limpieza ISO 4406 en rodamientos lubricados con aceite.

Las cadenas se utilizan para transmitir potencia. Los aceites o grasas para su lubricación deben poseer gran adherencia en todo momento. El lubricante debe ser resistente a la contaminación con polvos, partículas, agua, vapor o efectos de la alta temperatura y presión de trabajo. Para una lubricación periódica de cadenas se utilizan grasas, mientras que para aplicación continua es más frecuente el uso de aceites.

4.4.10.4 Parámetros de Diagnóstico para grasas lubricantes

Además de la consistencia (cuantificada como se dijo por la norma ASTM D 217), la capacidad a fluir o bombeabilidad es importante para los casos en que la grasa deba ser transportada por sistemas automáticos. La contaminación con agua (tanto en uso como en almacenamiento) provoca lavado, pérdida de consistencia y disminución de la resistencia a la oxidación. Los valores límites de alerta y alarma deben proponerse en relación con aquellos que posea la grasa sin uso; considerar, además, la influencia del factor operativo (contexto).

Mantenimiento Proactivo

Se resumen a continuación los parámetros de diagnóstico más importantes para una grasa.

Consistencia (ASTM D 217)
Punto de gota (ASTM D 2265)
Viscosidad aparente o bombeabilidad (ASTM D 1072 / D 1478), para grasas sin uso
Sangrado (ASTM D 1742)
Resistencia al agua (ASTM D 1264)
Capacidad antidesgaste (Ensayo de 4 bolas) (ASTM D 2266)
Carga de soldadura (Ensayo de 4 bolas) (ASTM D 2596)
Capacidad de carga (Ensayo Timken®) (ASTM D 2509)

4.4.11 Manejo y almacenamiento de Lubricantes

El lubricante es un componente más de la máquina como lo son engranajes, rodamientos, ejes, etc. Como tal, requiere ser cuidado y almacenado en condiciones que garanticen su máximo rendimiento cuando es instalado. A continuación algunas recomendaciones a tener en cuenta a la hora de almacenar y manipulear lubricantes.

√ Procurar un almacenamiento bajo techo en áreas limpias, ventiladas y con baja humedad.

√ Evitar estadías prolongadas a la intemperie; ciertos aditivos son afectados por las altas y bajas temperaturas.

√ Evitar golpes y daños en los envases, sean éstos tambores, bidones o baldes. Una vez abiertos garantizar un cierre adecuado para impedir derrames y contaminación.

√ Los tambores alojados horizontalmente en cunas deberán tener las dos bocas dispuestas de manera horizontal para lograr que el propio lubricante selle el ingreso de humedad.

√ Si los tambores deben ubicarse verticalmente (parados) y a la intemperie, procurar que guarden un pequeño ángulo de inclinación para evitar la acumulación de agua en la parte superior. El punto más bajo de la pendiente nunca deberá ser alguna de las dos bocas.

√ El almacén (depósito) de lubricantes debe estar separado y alejado de otros insumos como ácidos, pinturas, solventes, o productos sólidos que puedan generar atmósferas polvorientas. Utilizar algún sistema de identificación con carteles y etiquetas.

√ Asegurar que el tiempo en stock no supere el máximo indicado por el fabricante (generalmente de 2 a 3 años); ciertos aditivos como los antiespumantes siliconados pueden deteriorarse por separación de la base.

√ Consumir primero los aceites más antiguos que se encuentren en condiciones de uso, esto facilita la rotación y renovación del stock.

√ Implementar un sistema de codificación e identificación por medio de etiquetas que permita relacionar unívocamente el envase con la máquina en que se utiliza.

√ Mantener los aceites en sus envases originales (bien cerrados), para evitar los trasvases que aumentan el riesgo de contaminación.

Cuando se presenta la necesidad de sustituir el tipo de lubricante en reductores de velocidad, es imprescindible efectuar previamente una limpieza (flushing) con un aceite de menor viscosidad compatible con el aceite definitivo. Generalmente se limpia con el mismo aceite que se lubricará el mecanismo, sólo que de menor viscosidad.

El aceite *viejo* se debe drenar en caliente, e incorporar luego el de limpieza. Se deja funcionar durante poco tiempo y sin carga, se vacía y se rellena con el producto final. Esto arrastra las partículas de desgaste (por asentamiento, maquinado o contaminación) y disuelve los residuos del producto anterior.

4.5 Otras Técnicas Condicionales

La parte final de este capítulo describe brevemente otras técnicas condicionales usadas para descubrir fallas sintomáticas o imperfecciones en equipos e instalaciones[1]. El mayor beneficio se obtiene con la aplicación combinada de tecnologías; *ninguna herramienta predictiva por sí sola identifica la totalidad de las fallas sintomáticas de un sistema.*

Muchos ensayos no destructivos (END) tienen un fuerte poder de predicción. Se aplican en la etapa de fabricación de equipos y como criterio de aceptación de calidad y mantenimiento. Resulta ventajoso, sin embargo, conocer la **sensibilidad** y la **confiabilidad** intrínseca de cada técnica. La sensibilidad es una característica de la tecnología; la confiabilidad, depende de la experiencia del analista, de las condiciones ambientales, de la calibración de los instrumentos y de otros factores inherentes al contexto. Siendo que nunca ambas propiedades alcanzan el 100%, el ingeniero de mantenimiento debe evaluar la mejor relación para cada necesidad.

El objetivo de aplicar herramientas predictivas del tipo END, no es únicamente la detección del defecto; es preciso interpretar, también, los resultados para determinar la ubicación de la falla, identificar las causas y, sobre todo, estimar el tiempo de vida remanente del sistema. Este último punto requiere mucha experiencia del analista.

Cualquiera sea la técnica condicional escogida, es preciso definir los niveles de aceptación para el parámetro característico medido *(parámetro sensible de control)*, así como los valores de alerta y alarma correspondientes.

Un plan de inspección puede enunciar, por ejemplo, "*Verificar los anclajes de los portantes y el estado de las soldaduras*". Lamentablemente esta descripción no aclara cuál es el parámetro sensible, ni la técnica, ni el desvío tolerado. En su lugar sería conveniente lo siguiente:

√ *Aplicar manualmente una fuerza moderada sobre cada soporte estructural y verificar que los anclajes atornillados estén correctamente ajustados; no se aceptan flojedades. (Frecuencia: diaria).*

√ *Ensayar con tintas penetrantes las uniones soldadas para identificar fisuras superficiales, sólo se aceptan uniones soldadas sin grietas detectadas. (Frecuencia: semestral).*

4.5.1 Los Sentidos Humanos

Los sentidos humanos son altamente aprovechables para el diagnóstico prematuro de averías. Este tema fue abordado en el capítulo correspondiente a Mantenimiento Preventivo a través de las Rutinas de Inspección Estáticas y Dinámicas. Cuando se utilizan los sentidos humanos para detección, no vale la pena armar dos rutas de inspección, una para mantenimiento preventivo y otra para predictivo; directamente se agrupan todas en una única Hoja de Ruta.

A continuación se listan algunas fallas sintomáticas que pueden incluirse en las Hojas de Ruta Estáticas o Dinámicas[2], sabiendo aún que corresponden a chequeos condicionales cuya periodicidad estará dada por los conceptos ya vistos respecto al intervalo Δt_{SF}. Estos síntomas de falla, perceptibles según las capacidades de cada individuo, tienen un profundo sentido de la predicción y no tanto de la prevención.

a) Con máquina en funcionamiento.

Olores fuera de lo normal.
Pérdidas de lubricantes o fluidos de proceso.
Niveles de temperatura anormales[3].
Fugas en cañerías o conexiones.
Vibraciones y ruidos extraños.
Deterioro y estado de limpieza.
Variables de proceso fuera de los valores normales de operación, etc.

---

1 Se recomienda al lector consultar bibliografía especializada en cada una de estas tecnologías.

2 Ver Mantenimiento de Rutina - Chequeos de Recorrida, punto 2.3 del Capítulo 2.

3 Si bien los sentidos humanos hay que utilizarlos para diagnosticar fallas, el límite de su aprovechamiento estará dado por la inseguridad que corra el personal. Cuando se habla de controlar temperaturas, siempre es conveniente valerse de un pirómetro óptico antes que el tacto.

b) Con máquina detenida.

Inspección general de equipo.
Estado de corrosión de partes y componentes.
Pérdidas de lubricante, luego del desmontaje de algún subsistema.
Control de deformaciones o fisuras en materiales.
Estado de parámetros estructurales y soldaduras, etc.

Resulta interesante delegar en el personal de operación los chequeos *por sentido* de alta frecuencia, siempre bajo la supervisión de los responsables de Mantenimiento. Recordar que el departamento de Mantenimiento puede delegar la ejecución de los trabajos de inspección y monitoreo, pero no la responsabilidad de los mismos.

Nota: Si bien los sentidos humanos son, en muchos casos, las mejores herramientas de diagnóstico prematuro, en ningún caso debe exponérselos al riesgo de accidente. Aunque mermen su agudeza, utilizar siempre los elementos de protección personal recomendados para el contexto operativo del equipo bajo inspección.

4.5.2 Estetoscopía Industrial

Son instrumentos de operación sencilla, económicos y constituyen una gran ayuda para el personal de mantenimiento. Ofrecen una rápida respuesta sin mayores necesidades de capacitación, aunque la experiencia resulta valiosa para el diagnóstico. Si bien no encierra una dificultad escuchar y reconocer sonidos mecánicos, un diagnóstico confiable se alcanza solamente después de cierta experiencia. El estetoscopio industrial se utiliza para *escuchar* fallas en cojinetes, engranajes, sistemas hidráulicos o cualquier otro sistema mecánico.

4.5.3 Emisión Acústica

La Emisión Acústica (EA) como técnica predictiva surgió con la necesidad de localizar grietas, fisuras, discontinuidades o corrosión en el interior de los materiales y cuyo crecimiento pudiera convertirse en una fractura catastrófica. También llamada emisión de ondas de esfuerzo *(stress wave emission)*, se trata de un ensayo no destructivo (END) que identifica las señales emitidas por las discontinuidades internas cuando los cuerpos se tensionan, cargan o someten a esfuerzos.

El estado tensional que se logra mediante la aplicación de una carga progresiva, induce en los defectos ocluidos ondas elásticas ultrasónicas detectables por sensores y analizadores de EA. En términos sencillos puede decirse que, estimulando la estructura, se *escuchan* las ondas que se producen internamente. La energía detectada por EA se libera desde el interior del material a diferencia de otros métodos como el ultrasonido cuyo sistema de detección emite una señal y recibe su alteración. Pueden estudiarse defectos en varias clases de materiales, inclusive en compuestos como el PRFV[1].

4.5.3.1 Alcance y Aplicaciones

Como se dijo, se trata de un ensayo no destructivo que localiza deformaciones plásticas, grietas, corrosión, ruptura de oclusiones microscópicas o fugas, prácticamente en cualquier tipo de estructura sometida a esfuerzos o cambios de temperatura como tanques, recipientes de presión, tuberías, etc. En recipientes nuevos, se aplica conjuntamente con la prueba hidráulica (PH) para identificar un potencial defecto antes de la puesta en marcha. Hoy día, los ensayos de EA se usan para habilitación, rehabilitación y extensión de vida en recipientes sometidos a presión con certificación ante entidades públicas oficiales[2].

Una ventaja comparativa que brinda esta práctica frente a otras, como la prueba hidráulica, es que no genera grandes volúmenes de agua. Esto minimiza la necesidad de tratar efluentes muchas veces contaminados, ya que puede efectuarse con el mismo producto de la operación.

---

1 Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.
2 Secretaría de Energía de La Nación y Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS).

Dentro de sus aplicaciones más importantes encontramos:

- √ **Detección de corrosión**. Los productos derivados de la corrosión por lo general forman una cascarilla frágil que, cuando la estructura se carga o presuriza, se rompe emitiendo ondas de EA que se pueden detectar, registrar y analizar.
- √ **Tanques nuevos y sistemas bajo presión**. En ciertas ocasiones, conjuntamente al ensayo de prueba hidráulica, se realiza un monitoreo de emisión acústica. Si durante la prueba hidráulica se desarrolla algún defecto, puede descubrirse antes de la entrada en servicio del equipo.
- √ **Tanques API[1] de almacenaje**. El examen por EA en un tanque API requiere la aplicación de un estímulo mecánico que se logra llenando el mismo desde aproximadamente el 75% del nivel máximo operativo hasta el 100% (en la medida de lo posible). La prueba es útil para cumplir con la norma de certificación API 653 (Tank Inspection).
- √ **Cilindros de gas**. Esta prueba fue aprobada en muchos países para recalificar y habilitar cilindros de gas natural.
- √ **Cañerías**. Permite detectar fugas a gran profundidad en líneas enterradas o aisladas y, de acuerdo al contexto, determinar su ubicación con bastante exactitud.

4.5.3.2 Introducción al Principio de Funcionamiento

La figura siguiente muestra un cuerpo sometido a esfuerzos. Si existe un desarrollo del defecto ante la aplicación de la carga de prueba, la metodología revelará su existencia y ubicación.

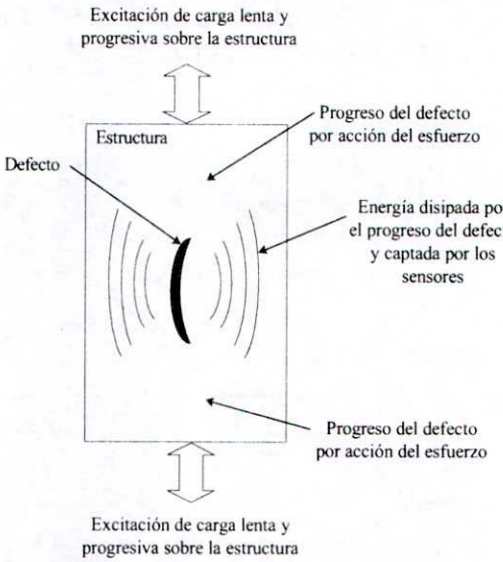


Figura 4.5.1 Repercusión de un defecto en el interior del material bajo carga.

La discontinuidad genera, bajo acción de una carga, un conjunto de ondas que se expanden dentro del material y, al llegar a la superficie, pueden detectarse por transductores (sensores) que las envían a un analizador. Las ondas emitidas resultan proporcionales a la carga aplicada, y su progreso depende de no interrumpir el aumento lento y progresivo de la excitación[2].

Los parámetros característicos de una señal de EA son el **umbral** (nivel sonoro establecido como referencia paramétrica), la **amplitud**, la **duración** (tiempo durante el cual la señal se mantiene por encima del umbral), el tiempo hasta alcanzar la **máxima amplitud**, la **energía** y el **conteo de picos** (número de veces que la señal superó el umbral).

La amplitud usualmente se expresa en decibeles (dB_{ae}). Las señales menores a 35 dB_{ae} se consideran débiles, entre 35 y 75 dB_{ae} de intensidad media, y superiores a 75 dB_{ae}, intensas. A menudo las mayores amplitudes están vinculadas con procesos de deformación como el desarrollo de una grieta.

---

1 API: American Petroleum Institute.

2 Denominado efecto "Kaiser", en honor al investigador que lo reportó, establece que una vez aplicada una carga, y habiéndose identificado señales de emisión acústica, no se manifestarán señales adicionales sino hasta que se aplique una carga mayor a la previamente aplicada.

4.5.3.3 Procedimiento de Ensayo

Una prueba de mantenimiento condicional por EA consta de las siguientes etapas:

√ Información y puesta apunto del equipo, con la consecuente ubicación definitiva del conjunto de sensores.
√ Adquisición de datos.
√ Análisis e interpretación de los datos.
√ Recomendaciones del especialista inspector.

La puesta a punto del instrumental comienza obteniendo datos de la estructura a probar. El más importante es la carga o presión máxima a la que fue sometida la estructura en los últimos meses de operación (PMT_{UM}); además, se determina cuál será el escalonamiento de la carga de ensayo. Otros datos a considerar son el tipo de material, la temperatura de trabajo, clase de aislante, fecha y datos de la última inspección realizada. El sistema se calibra ubicando los sensores según pruebas de atenuación y simulando una fuente de emisión acústica estandarizada. Fijando el nivel de detección apropiado *(umbral)* para filtrar la mayor parte del ruido externo, el equipo está en condiciones de adquirir datos.

El gráfico de la figura 4.5.2 pertenece a un ensayo hecho en un tanque API cuyo contenido es ácido sulfúrico. Para efectuar la prueba, se determinó que era necesario comenzar con un nivel de carga cercano al 90% de la altura del recipiente durante 3 minutos. A partir de ese momento, obsérvese el escalonamiento y los tiempos de meseta adoptados para cada etapa. El especialista es quien define el escalonamiento de carga y el tiempo de residencia en cada meseta. Durante todo el proceso, los sensores registran y almacenan las señales de emisión acústica.

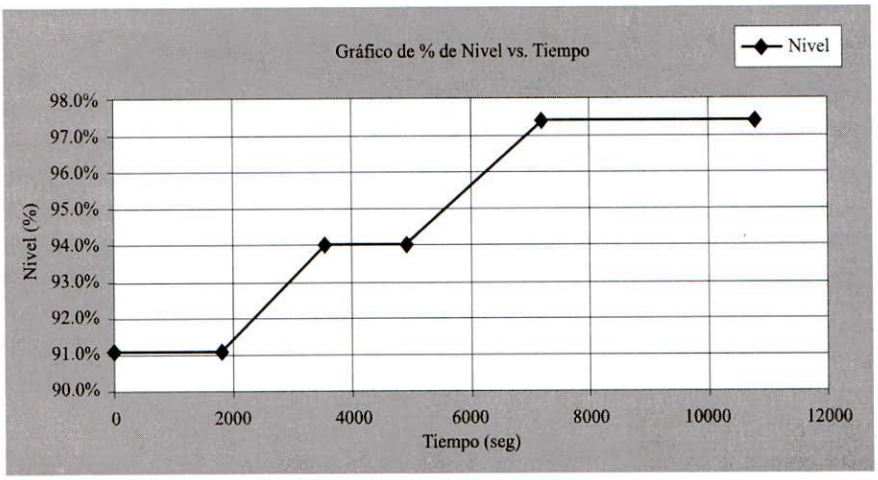


Figura 4.5.2 Escalonamiento de carga (nivel de líquido) adoptado para el ensayo de un tanque API.

La localización de eventos *(actividad)* sobre la envolvente y fondo del tanque, se aprecian en las figuras 4.5.3 y 4.5.4 respectivamente; utilizando la tecnología MONPAC PLUS®, propiedad de la firma EDC S.A. (Energy Development & Cons. Argentina S.A.).

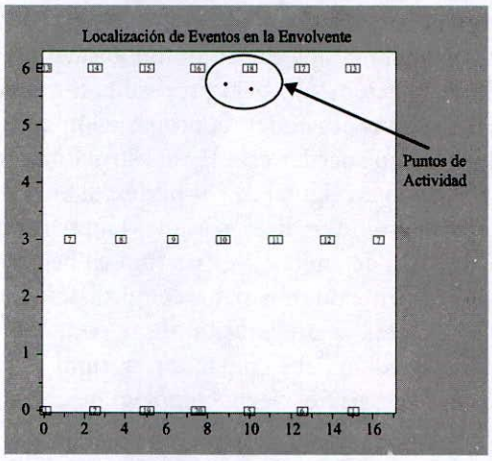


Figura 4.5.3
Localización de eventos (actividad) sobre la envolvente de un tanque API de producto.

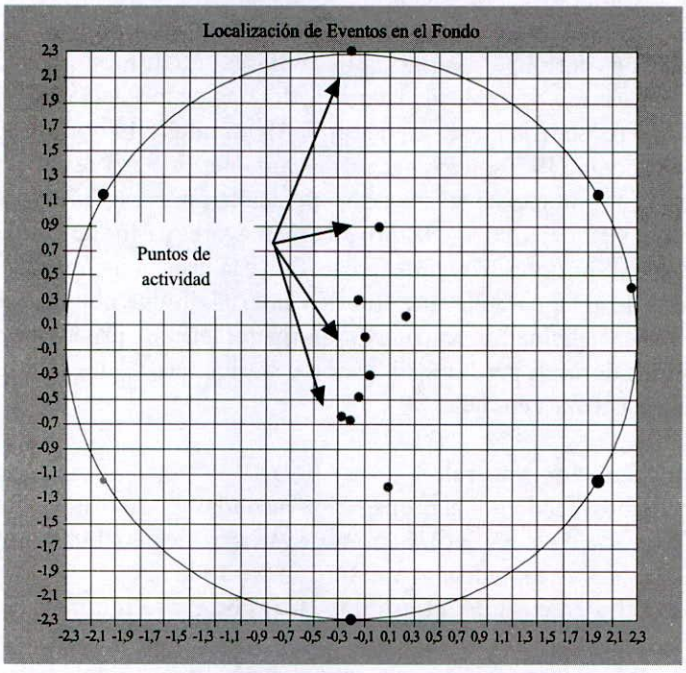


Figura 4.5.4
Localización de eventos (actividad) en el fondo de un tanque API de producto.

4.5.3.4 Ventajas y Desventajas

Ventajas	Desventajas
Es posible ensayar la totalidad de la estructura simultáneamente, identificando el crecimiento del defecto con relación a la carga aplicada.	La adquisición de datos es afectada por ruidos ajenos a la estructura si no se filtran eficazmente.
Por lo general, sólo es necesario someter el sistema a un 10 o 15% de sobreesfuerzo respecto a la condición normal de operación.	Un diagnóstico adecuado depende del grado de especialización y experiencia del analista.
Es un ensayo dinámico y no destructivo. No requiere gran preparación.	Se requiere de un estímulo o carga para efectuar la prueba.
Tiempo de ensayo breve con relación a otras prácticas.	La técnica no está ampliamente comercializada.
No genera desechos o efluentes.	Ciertos defectos no emiten EA, por lo que no pueden detectarse.
No es necesario retirar completamente de servicio la instalación (menor lucro cesante).	Dificultad para determinar el tamaño del defecto.

Tabla 4.5.1
Ventajas y Desventajas de aplicar Emisión Acústica.

4.5.4 Prueba Hidráulica y Neumática

La prueba hidráulica (PH) es considerada hoy día como un ensayo predictivo pero de índole destructivo. Es preciso someter la instalación, aún bajo proceso controlado, a una presión superior a la del diseño[1]; lo que provoca, en ciertas ocasiones, la propagación de fallas (discontinuidades) que impiden su posterior utilización. De no suceder el colapso estructural, la incertidumbre se presenta al ignorar si el sistema quedó resentido en alguna de sus partes. Si bien el crecimiento o propagación de las fallas puede no ser completo o, como se dice, "pasante" (sin pérdida de fluido), éstas permanecerán en el material durante el servicio dejando a la estructura en peores condiciones que antes de la prueba. Esta técnica persigue básicamente dos objetivos: comprobar la hermeticidad de la instalación y verificar su resistencia. Por lo general, la preparación de la estanqueidad no es demasiado compleja, aunque sí laboriosa. Cada aplicación debe contar con normas y requerimientos específicos de cumplimiento obligatorio pero es necesario el cierre completo de entradas, bridas, visores, puertas, válvulas, colectores, etc.

La prueba consiste en llenar el sistema con agua u otro fluido (no corrosivo, ni tóxico, ni explosivo) e incrementar la presión con la ayuda de una bomba de acuerdo a un procedimiento preestablecido. El control de pérdidas (hermeticidad) se hace recorriendo la estructura y monitoreando, además, el manómetro correspondiente de control para verificar que la presión no disminuya. Dado que el tiempo de residencia del líquido presurizado depende del volumen, del tipo de instalación y del tipo de ensayo, las pruebas de hermeticidad o resistencia pueden requerir de 10 minutos a 10 horas, dependiendo del caso. Una incomodidad que genera la PH, son los grandes volúmenes de agua residual. Si además, el agua usada entró en contacto con productos internos de la operación, podría ser inevitable tratarlos y disponerlos según la legislación vigente; todo lo cual provocaría mayores gastos de mantenimiento.

Una alternativa de ensayo por presurización, lo constituye la prueba neumática (PN). Ciertas instalaciones prohíben el uso de agua para elevar la presión interna, lo que obliga al uso de aire (seco) o nitrógeno. El control de hermeticidad se realiza con un manómetro de prueba de alta precisión y con soluciones jabonosas indicadoras de pérdidas. El tiempo de residencia del gas a la presión y temperatura establecida varía según el sistema a ensayar.

4.5.5 Ultrasonido (por excitación Natural)

El sonido es un fenómeno provocado por la propagación de ondas mecánicas de vibración en cualquier medio material (no se transmite en el vacío). El hombre es capaz de percibir, a través del aire, sonidos (ondas de presión) cuya frecuencia se encuentre entre 16 Hz y 20 kHz.

La tecnología industrial predictiva de ultrasonido (US) por excitación natural (también conocida como *ultrasonido pasivo*) puede medir fuentes sónicas propagadas por el aire de hasta 100 kHz (alta frecuencia) con el debido uso de sensores especiales que aíslan el ruido ambiental.

De la misma forma que la termografía transforma el espectro infrarrojo en imágenes visibles, los sistemas de US transforman el espectro sonoro de alta frecuencia en un rango de sonidos perceptibles por el oído humano. Las ondas sonoras recibidas por los sensores de US también pueden graficarse en función del tiempo para construir curvas o espectros.

4.5.5.1 Alcance y Aplicaciones

Esta técnica de mantenimiento condicional *no invasivo*, se aplica con éxito para detectar fugas de presión o vacío, averías mecánicas, obstrucciones, desgaste o fallas incipientes en sistemas eléctricos, a través de la variación de los parámetros sonoros del componente *escuchado*. Los siguientes son algunos de los campos de aplicación más frecuentes.

√ Cañerías, válvulas, tanques, bombas, líneas presurizadas, circuitos hidráulicos y trampas de vapor.
√ Calderas, intercambiadores de calor, condensadores y recipientes al vacío.
√ Rodamientos, cojinetes, engranajes, y sus condiciones de lubricación.

---

1 En las pruebas de hermeticidad y resistencia, los valores de presurización y su tiempo de permanencia varían según muchos factores. En todos los casos deben respetarse las normas establecidas por los entes reguladores y las autoridades competentes.

√ Compresores, motobombas, ventiladores, motores y generadores.
√ Transformadores, tableros, interruptores, líneas de distribución eléctrica de alta tensión.
√ Cualquier efecto eléctrico que genere sonido de alta frecuencia.

Es particularmente útil para estudiar rodamientos de baja velocidad (en oposición al análisis de vibraciones) y para detectar fallas incipientes en los internos de transformadores de alta tensión (nótese la posibilidad de combinar US con los Análisis de Aceite). En purgas, válvulas de vapor y aire comprimido pueden identificarse fugas y atascamientos.

Los modelos de última generación tienen la versatilidad de medir tanto ondas sonoras transmitidas por el aire (denominadas de largo alcance y eficaces para observar tendidos eléctricos y fugas), como señales acústicas generadas y propagadas dentro de cuerpos materiales[1]. En este último caso, los transductores se adhieren magnéticamente y sirven para monitorear elementos rotantes como rodamientos, ejes, bombas y ventiladores.

Nota: La lubricación de rodamientos puede realizarse en forma conjunta con un sensor de ultrasonido direccional, montado magnéticamente cerca del alojamiento del rodamiento para medir su nivel de ruido en decibeles (dB). Durante la inyección de la carga lubricante, se "escucha" el mecanismo y se aguarda una caída de 8 dB en el nivel de ruido[2]; esto asegura incorporar la cantidad exacta de lubricante evitando la falta o el exceso.

Las aplicaciones más destacadas son:

√ **Inspección de instalaciones de Vapor**

Cada vez resulta más frecuente y rentable el uso de US para verificar el funcionamiento de válvulas y purgas[3] de vapor. Es factible descubrir pérdidas por las uniones de bridas y evaluar la condición del flujo circulante en las cañerías, en el rango de 25 a 40 kHz. Las fugas se perciben, en muchos casos, como un *silbido*.

Pueden lograrse significativos ahorros de energía detectando y evitando pérdidas de vapor vivo en colectores de condensado.

√ **Sistemas Eléctricos**

Algunos sistemas eléctricos (líneas de distribución o subestaciones), ante la presencia de una falla sintomática como corona o arco eléctrico, generan sonidos de alta frecuencia cercanos a los 40 kHz que pueden detectarse con receptores de largo alcance llamados *scanner's*.

Siempre es conveniente establecer la relación proporcional entre el grado de deterioro del elemento y el nivel sonoro medido en dB. Así, será posible definir los valores de alerta y alarma para cada situación de acuerdo a la frecuencia característica.

√ **Inspección de Rodamientos**

Los rodamientos de baja velocidad (< 200 rpm), al paso de los elementos rotantes sobre la pista, provocan ondas sonoras proporcionales al estado de lubricación, a los defectos incipientes, al juego interno o a los deterioros de jaula.

Se utilizan sensores que monitorean el nivel de ruido por encima de los 25 kHz.

Algunos instrumentos y sensores modernos de US, pueden incorporar pirómetros ópticos portátiles y sensores de RPM para trabajar en forma integrada con analizadores de vibraciones y sistemas de infrarrojo.

√ **Otros Sistemas Mecánicos**

Se aplica básicamente para detectar fugas en válvulas de seguridad, válvulas de flujo o de retención, tubos de intercambiadores, sistemas de inyección de combustible, líneas de aire comprimido, e identificar fallas por *soplido* en válvulas de compresores alternativos.

Es particularmente interesante que el lector acuda a bibliografía especializada en la predicción de fallas (fugas) por *US pasivo de contacto* para grandes válvulas (> 8").

---

1 Este método de monitoreo por ultrasonido (US) se diferencia de la Emisión Acústica (EA) en que la excitación es intrínseca a la operación del componente, mientras que en EA la carga de prueba se induce intencionalmente.

2 Información referida al equipo ULTRAPROBE® 201 - GRADE CADDY, comercializado por la firma UE Systems Inc.

3 Los fabricantes de purgadores de vapor recomiendan el US como la mejor técnica predictiva para detectar fallas en tales equipos.

Para los casos de elevada severidad operacional (cuando la consecuencia de la falla tiene alto impacto), la industria comercializa productos específicos para el monitoreo continuo de la variable sonora (en dB) alrededor de los 40 kHz. Estos equipos envían una señal calibrada (4-20 mA) al sistema de control. Las configuraciones lógicas de monitoreo continuo se usan como *protecciones indicativas* y, en casos extremos, como *protecciones interruptivas*[1].

4.5.5.2 Ventajas y Desventajas

Ventajas	Desventajas
Se obtienen muy buenos resultados aún en zonas con *ruido* filtrando los sonidos perceptibles por el hombre (audibles).	No es sencillo establecer el tamaño de la fuga, el grado de deterioro o el tipo de defecto.
Es posible combinar la técnica de US con otras herramientas predictivas como Análisis de Vibraciones, Termografía o Análisis de Aceite.	En sistemas de vapor con gran número de componentes (purgas por ejemplo), pueden obtenerse resultados no precisos debido a la interferencia entre ellos.
No se requieren altos niveles de capacitación para ciertas aplicaciones.	Se presentan dificultades de aplicación en geometrías muy complejas.
Pueden medirse puntos alejados dada su capacidad de orientación.	Algunas fallas sintomáticas son sólo detectables por especialistas calificados.

Tabla 4.5.2 Ventajas y Desventajas de aplicar Ultrasonido Pasivo.

Como ocurre con otras herramientas de mantenimiento a condición, deben establecerse los valores de alerta y alarma de **cada parámetro sensible** (en este caso el nivel de ruido se mide en dB) en base a la experiencia del personal de planta, datos del fabricante o especialistas en esta técnica predictiva.

4.5.6 Ultrasonido (por excitación de Eco Ondas)

Es posible utilizar las ondas ultrasónicas (> 200 kHz) para determinar el espesor de materiales metálicos y no metálicos, o bien para identificar discontinuidades en su interior. Los procesos de desgaste acelerado por fricción o corrosión por lo general van acompañados de una disminución o alteración del espesor, lo que constituye una posible falla sintomática.

Las ondas acústicas se ven afectadas en su tiempo de recorrido dentro del material, o en su frecuencia, cuando cambia el medio de propagación. Dado que cualquier discontinuidad como las mencionadas provoca cambios en el medio de propagación, se aprovecha este fenómeno para detectarlas. La resistencia que ofrece el material a propagar señales acústicas[2] es una propiedad vital en el análisis de fallos por *US de eco-pulso o activo.*

4.5.6.1 Alcance y Aplicaciones

Esta metodología se aplica a la mayoría de materiales (ferrosos y no ferrosos), y una vez que el instrumento ha sido calibrado, las mediciones son sencillas. Se recomienda, de todas formas, un técnico experimentado para el diagnóstico. Se usa para medir espesores, o para detectar discontinuidades tales como fisuras, defectos ocluidos, poros, errores de soldadura, cambios de material, variación en la concentración de líquidos, falta de adhesión entre materiales, defectos superficiales, grado nodular de una fundición, heterogeneidad en el curado estructural de hormigón o altas temperaturas[3].

4.5.6.2 Introducción al Principio de Funcionamiento

La señal o pulso ultrasónico (de 200 kHz a 25 MHz) es enviado por un emisor de US (palpador) de alta sensibilidad desde la superficie de la pieza hacia su interior, quien además, recibe el rebote y lo canaliza electrónicamente hacia un analizador especial u osciloscopio. La señal recibida puede provenir del lado opuesto del material (reflejo de fondo) o bien desde una discontinuidad yacida dentro del mismo. Los equipos de US por eco pulsos, operados por personal especializado, determinan con bastante precisión la ubicación y tamaño del defecto.

Es preciso el uso de una interfase o acoplante (agua, película fina de aceite o grasa) entre la superficie a ensayar y el palpador, para evitar que la transmisión del pulso tome contacto con el aire que lo atenua-

---

1 Ver punto 5.1.1 "Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección" del Capítulo 5.

2 Se define como impedancia acústica y es el producto entre la velocidad de la señal (sonido) y la densidad del material dentro del cual se propaga la señal ($Z = \rho.V$).

3 Denominada termometría ultrasónica, se utiliza para medir temperaturas mayores a los 3.000 °C.

ría casi completamente impidiendo su propagación. Téngase presente que la velocidad de propagación depende del tipo de material. Los métodos que utilizan agua como acoplante se llaman de **inmersión**, y la pieza se sumerge en agua junto con el transductor. Por su parte, en los métodos de **contacto** se aplican interfases de aceite o grasa.

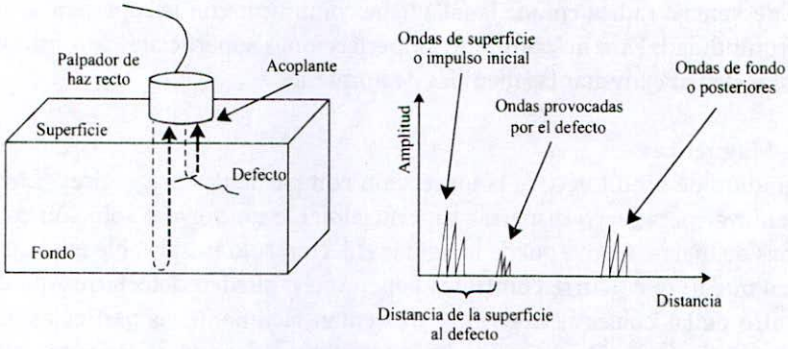


Figura 4.5.5 Esquema básico de identificación ultrasónica de defectos por contacto.

Los palpadores son sensibles a la detección de pequeñas discontinuidades y se obtienen buenos resultados aún con grandes espesores. Sin embargo, no es sencilla la localización del defecto. Para subsanar el inconveniente se han desarrollado palpadores de haz recto, angular o dual. En el caso particular de inspección de soldaduras es necesario el uso de palpadores de haz angular. El instrumental de US debe calibrarse por personal experimentado y los patrones de calibración, por lo general, tienen un costo elevado.

4.5.6.3 Ventajas y Desventajas

Dentro de las ventajas se destaca que sólo es necesario acceder a la pieza por uno de sus lados, por lo que resulta útil para medir espesores en lugares de difícil acceso. Además, permite monitorear casi cualquier tipo de material. Encuentra limitaciones al determinar la ubicación exacta de los defectos (fundamentalmente en geometrías complejas), lo que es posible únicamente con personal altamente capacitado.

4.5.7 Tintas Penetrantes

Las grietas o microfisuras que emergen a la superficie (imperceptibles a simple vista) son fallas sintomáticas que, en ocasiones, anteceden al colapso estructural. Tal situación de potencial falla funcional puede evidenciarse utilizando *tintas penetrantes*.

Resulta de utilidad para detectar fallas con riesgo estructural en fuselajes, estructuras portantes, ejes de turbina, álabes, hélices, soldaduras, calderas, tanques metálicos y no metálicos, materiales plásticos y cerámicos, entre otros.

4.5.7.1 Procedimiento de Ensayo

- √ Lijado o limpieza superficial con **removedor / solvente** tipo Magnaflux® SKC-S ó similar. Se deben eliminar restos de grasa, aceite, pintura, polvo, óxido u otros contaminantes.
- √ Secado de la superficie con aire seco, papel absorbente o paño especial.
- √ Aplicación del fluido activo o **penetrante** (puede ser fluorescente) tipo Magnaflux® SKL-SP1 ó similar, con pincel o spray. Permanencia de 10' a 1 hora dependiendo de la aplicación y el producto utilizado.
- √ Remoción del excedente activo y aplicación del **revelador** tipo Magnaflux® SKD-S2 ó similar.
- √ Observación detenida de la superficie para ver los defectos acusados por el revelador que, además, debe permanecer lo suficiente para cumplir su función.
- √ Limpiar, indicar la zona con falla y registrar su ubicación para una posterior reparación o cambio de la pieza dañada.

Para aumentar la sensibilidad, algunas aplicaciones usan carga electrostática que garantiza el ingreso del penetrante en el defecto[1], o bien compuestos fluorescentes a la luz ultravioleta (o luz negra).

---

1 RCMII Reliability Centred Maintenance - John M. Moubray, página 394.

4.5.7.2 Ventajas y Desventajas

La aplicación de tintas penetrantes tiene un costo relativamente bajo y el ensayo es sencillo. La interpretación del resultado (identificación del defecto) es fácil pues la técnica tiene muy buena sensibilidad para grietas superficiales y de poca profundidad.

Su principal desventaja radica en que la falla debe comunicar con la superficie y, además, es difícil cuantificar su profundidad. Para no confundir imperfecciones superficiales con fisuras, se requiere de pericia. Además, se deben extremar las medidas de limpieza.

4.5.8 Partículas Magnéticas

Un método difundido de monitoreo, es la inspección con partículas magnéticas. Consiste en magnetizar la pieza a ensayar para luego dispersar superficialmente un polvo o solución con alto contenido de partículas finas de hierro. Como puede imaginar el lector, sólo es aplicable en materiales ferromagnéticos y, al igual que lo que ocurre con tintas penetrantes, pueden detectarse sólo discontinuidades superficiales dentro de las cuales se depositan y orientan fácilmente las partículas de hierro atraídas por el campo magnético inducido. En rigor, las discontinuidades superficiales provocan en el campo magnético lo que se conoce como *dispersión de campo* o *campo de fuga*. Se utilizan también partículas magnéticas fluorescentes (de alta permeabilidad magnética) para aumentar la sensibilidad, pero requieren de luz ultravioleta para ser observadas.

Para el diagnóstico se aplican los mismos conceptos y precauciones que en tintas penetrantes. Solamente en ciertos casos pueden identificarse grietas o fisuras que no emergen completamente a la superficie (*dispersión de campo* apenas perceptible).

Una eventual alternativa es utilizar *compuestos magnéticos curables*. La solución magnética, que posee en suspensión finas partículas ferromagnéticas, se seca después de cierto tiempo. Las partículas se depositan en las proximidades de la grieta (por dispersión de campo) y, cuando se retira el compuesto curado, pueden observarse del lado opuesto delgadas líneas oscuras que denotan la presencia del defecto. Los requisitos de preparación superficial son similares a los recomendados para las tintas penetrantes.

4.5.9 Radiografía Industrial

La radiografía industrial consiste en exponer una pieza a la acción de Rayos X ó Rayos Gamma, los que poseen la cualidad de traspasar la materia. Siendo que el grado de absorción y dispersión a la radiación electromagnética (EM) depende del espesor y tipo de material (las discontinuidades presentan un cambio de densidad en la materia), se pueden detectar las imperfecciones internas de una pieza mediante una placa fotosensible ubicada detrás de ella. La placa o pantalla se impresiona de manera proporcional al nivel de radiación que deja pasar el cuerpo radiado.

Las discontinuidades absorben diferente cantidad de energía (fotones), y la cantidad que llega a la placa será distinta para cada área radiada. Estos cambios de intensidad sobre la placa (película o pantalla radiográfica) dejan en evidencia los defectos buscados.

4.5.9.1 Alcance y Aplicaciones

La técnica detecta cambios de material, huecos, oclusiones internas, fisuras, porosidades, grietas y discontinuidades, que se aprecian en la película como manchas o líneas oscuras. Se utiliza con éxito en el análisis de soldaduras, en la fase de mantenimiento estructural y como criterio de aceptación en la fabricación de piezas. La sensibilidad es baja para defectos pequeños y superficiales, aunque puede detectar imperfecciones en materiales ferrosos y no ferrosos como el polietileno. Se requiere de personal muy capacitado y con las acreditaciones necesarias de índole legal porque se trata de un proceso riesgoso. La seguridad es preponderante y las personas deben estar capacitadas para operar estos equipos bajo las más estrictas normas de seguridad que impone la metodología. Cualquier situación fuera de control puede poner en riesgo la vida misma de las personas circundantes, por lo que todos los operadores van provistos de dosímetros que miden en forma permanente el nivel de radiación recibido.

4.5.9.2 Introducción al Principio de Funcionamiento

El equipamiento está constituido por una fuente radioactiva, un contenedor, colimadores, un sensor radioactivo (película o pantalla fluorescente) y pantallas intensificadoras de plomo. Como manifiesta el punto 4.3.3, el espectro electromagnético es muy amplio y la radiación de alta energía son ondas EM que poseen una frecuencia (f) superior a 3×10^{17} Hz y una longitud de onda (λ) inferior a 6×10^{-10} m. Obsérvese la figura 4.3.1 de este capítulo.

La radiación de Rayos X se genera con una fuente o tubo de rayos catódicos cuya energía depende del voltaje aplicado que, a su vez, determina el poder penetrante de la radiación. Los Rayos Gamma (gammagrafía) se generan con isótopos radioactivos artificiales como el iridio[192] y sin necesidad de una fuente auxiliar de tensión. El elemento detector de la radiación, donde se verá impresa la imagen radiográfica, puede ser simplemente una película sensible a la radiación electromagnética o bien, una pantalla fluorescente que convierta el nivel de radiación en intensidad luminosa. Las pantallas fluorescentes proveen una imagen radiográfica en tiempo real denominada *radioscopia*. Se aplica principalmente en situaciones de monitoreo continuo, inspecciones en tiempo real y detección. Se obtienen imágenes un tanto difusas que dificulta observar defectos pequeños. Los colimadores direccionan con precisión la energía emitida sobre la superficie y evitan la dispersión del haz EM. Esto aumenta la seguridad para el personal e incrementa la sensibilidad del monitoreo. Las pantallas intensificadoras son chapas delgadas de plomo ubicadas antes y después de la película, para eliminar la radiación dispersa y mejorar la calidad de la imagen.

La figura 4.5.6 muestra un esquema simplificado con la posición relativa de los objetos en una radiografía industrial.

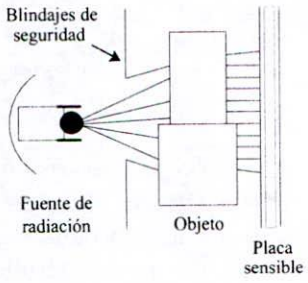


Figura 4.5.6 Posición relativa de los elementos usados en Radiografía Industrial.

Para lograr mayor nitidez o definición, el especialista debe determinar la distancia "fuente - objeto - elemento sensible". El tiempo de exposición varía según las condiciones de la pieza, espesor, tamaño e intensidad de los rayos con que se *bombardea* el material; sin embargo, en raras ocasiones supera los 10 minutos. La intensidad de radiación recibida por la pieza durante el tiempo de exposición se llama *dosis*.

4.5.9.3 Ventajas y Desventajas

Ventajas	Desventajas
Detecta defectos en el interior de piezas con geometría variable.	No pueden identificarse con facilidad defectos pequeños o superficiales.
Da buenos resultados para una gran variedad de materiales.	El costo de aplicación es, por lo general, elevado.
El tiempo de preparación y ensayo es breve respecto a otros END.	El riesgo inherente de la técnica obliga a extremar las medidas de seguridad.

Tabla 4.5.3 Ventajas y Desventajas de aplicar Radiografía Industrial.

4.5.10 Extensometría (Strain Gauges)

Es una técnica de mantenimiento predictivo (en ocasiones proactivo) de índole **no destructivo** (END) basada en el principio físico que establece que cualquier cambio en las dimensiones de un elemento conductor produce una variación proporcional en su resistencia eléctrica. Los desplazamientos o deformaciones provocadas por los esfuerzos pueden identificarse con transductores pasivos denominados *strain gauges* o *galgas extensométricas*. Se montan o adhieren sobre la superficie a inspeccionar tratando, en todo momento, que la superficie activa del strain gauge tome contacto con la potencial discontinuidad o variación. Se fabrican con los siguientes componentes:

- √ Un elemento resistivo (banda extensométrica) sensible a deformaciones y sobre el que se aplica una diferencia de potencial.
- √ Una lámina de contacto o elemento flexible dentro del cual se encuentra inserta la banda extensométrica.
- √ Un circuito eléctrico balanceado de medición (puente de Wheatstone).

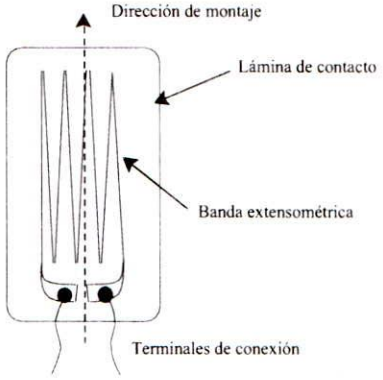


Figura 4.5.7 Esquema básico de un Strain Gauge o galga extensométrica.

El método resulta ciertamente útil para inspeccionar estructuras metálicas y no metálicas como puentes, obras civiles, tanques, fuselajes, etc. Los strain gauges tienen gran facilidad de adherencia sobre cualquier tipo de superficie y son de fácil instalación. Así mismo, utilizar varios de ellos aumenta la sensibilidad.

El inspector debe considerar la distorsión por efecto térmico porque la resistencia eléctrica del elemento depende de la temperatura.

4.5.11 Boroscopía Industrial

Se trata de una técnica visual remota que aumenta la capacidad de observación para lugares que, de lo contrario, serían inaccesibles. Están constituidos por una lente (o cámara) que envía una imagen óptica (o señal de video) a un visor o monitor. Esto último los diferencia entre ópticos y electrónicos. Suelen usarse también en lugares de alto riesgo para la seguridad o el medio ambiente, como herramienta de observación a distancia.

4.5.11.1 Alcance y Aplicaciones

La cantidad de aplicaciones que encuentra la boroscopía industrial, es infinita. Los boroscopios (endoscopios en medicina) pueden detectar defectos superficiales, corrosión, fisuras, fatiga, desgaste, pérdidas, flojedades, incrustación, errores de soldadura, acumulación excesiva de material, taponamiento, etc.

Es una técnica recomendada especialmente para lugares donde una inspección visual de rutina requeriría desarmar gran parte de los mecanismos. Se listan a continuación los lugares o instalaciones de mayor utilización.

- √ Recipientes pequeños, tuberías, orificios, conductos, cañerías, tubos de calderas.
- √ Espacios confinados, ambientes contaminantes y atmósferas peligrosas.
- √ Estructuras abiertas pero inaccesibles como fuselajes y turbinas.

√ Intercambiadores de calor, líneas subterráneas, cajas de engranajes, cámaras, interno de motores, bombas y compresores.
√ Cualquier equipo en que sea imposible el acceso o bien el ingreso represente un riesgo para la seguridad.

Actualmente están más desarrollados los boroscopios flexibles cuya transmisión de la señal de video y la iluminación se conducen por fibra óptica. Un grupo de fibras transporta la señal enfocada por la cámara y el otro conduce la energía para iluminar la zona observada. La señal se procesa digitalmente pudiendo realizar tratamiento de imágenes de alta resolución y nitidez. Algunos productos controlan la cámara de video de manera remota obteniendo imágenes panorámicas en cualquier dirección. Una pequeña lámpara provee la luz necesaria. La limitación de longitud está dada básicamente por los inconvenientes físicos que representa manejar largas extensiones de fibra (sobre todo para penetrar en el sistema).

4.5.11.2 Ventajas y Desventajas

La ventaja más importante está dada por el hecho que se evitan desarmes y desmontajes, lo que permite obtener un panorama visual con bajo gasto de mantenimiento. Desde este punto de vista, se trata de un método relativamente económico y los diagnósticos son prácticamente inmediatos. Las fotografías tomadas pueden tratarse digitalmente sin pérdida de nitidez.

El mayor inconveniente es que sólo se inspeccionan zonas puntuales, requiriendo de mucho tiempo para barrer grandes superficies.

4.5.12 Análisis de Motores Eléctricos

Los motores eléctricos de inducción (MEI) pertenecen al conjunto de los activos físicos de planta más utilizados en la actualidad. Algunas industrias cuentan con cientos y a veces miles de ellos. Existen, entre otros, de corriente continua, alterna, sincrónicos y de rotor bobinado. Sólo pretende este punto describir brevemente las acciones para detectar sus posibles causas de falla a través de ciertos parámetros sensibles de monitoreo.

Mucho se ha investigado hasta el momento sobre detección de fallas en MEI. Utilizar técnicas de diagnóstico temprano (mantenimiento proactivo) permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo, evitar la falla funcional del motor, reconocer la causa raíz y, en ocasiones, convertir la falla sintomática en reversible.

Conviene recordar que un soporte importante lo constituye la termografía infrarroja; ya se ha mencionado la importancia de complementar termografía infrarroja con otras metodologías de diagnóstico.

Algunos autores dividen las técnicas de monitoreo para los MEI en *estáticas* y *dinámicas*.

4.5.12.1 Técnicas Estáticas de Inspección

Se llevan a cabo con el motor detenido y no perjudican de ninguna manera la integridad física del mismo, dado que se aplican bajos voltajes de excitación y se generan, por consiguiente, pequeñas corrientes de circulación. Las pruebas de inspección estáticas pueden realizarse en campo (desde los propios terminales del motor o desde el circuito de potencia[1]), o bien en el taller como pruebas de banco antes de la puesta en marcha.Muchas fallas sintomáticas en los circuitos de potencia pueden detectarse con termografía; sin embargo, en ese caso, la prueba es dinámica. (Ver punto 4.3).

Nótese que para un mismo modo de falla (por ejemplo *corrosión en terminales o contactos flojos*), una acción **predictiva** se logra con un termograma; mientras que el estudio eléctrico del circuito de potencia representa más bien una acción del tipo **proactiva**. Entender cabalmente tal diferencia redunda en beneficios a la hora de establecer planes de mantenimiento basados en condición.

Resistencia a tierra o "megado". Los instrumentos se llaman medidores de aislación o sencillamente *megger's*. Determinan el valor de resistencia a tierra (RTG) de los circuitos (resistencia de la aislación), aplicando cierto voltaje y controlando la corriente de retorno. Se intenta identificar, por este medio, la existencia de fugas de corriente a tierra con la disminución del valor RTG.

---

1 Se denomina ***circuito de potencia*** *al conjunto de elementos comprendidos entre el centro de control de motores (CCM) y la bornera del motor. Incluye conductores, interruptores, barras, contactores, fusibles, protecciones, etc.*

Lamentablemente el ensayo no brinda un diagnóstico completo pues si bien la aislación a tierra puede tener un alto valor resistivo (es lo buscado), puede existir de todas formas una baja resistencia o corto entre espiras lo cual representa, en sí mismo, otro modo de falla.

Índice de Polarización. Para identificar modos de falla no descubiertos con el *megado*, se usa este ensayo que consiste en evaluar el aumento progresivo de la *resistencia de la aislación* del estator (por humedad / suciedad) conforme se aplica una tensión (c.d.) durante cierto tiempo estandarizado (por ejemplo diez minutos). Se grafica el parámetro sensible durante toda la prueba y el tamaño de las irregularidades de la curva indican el estado de la aislación.

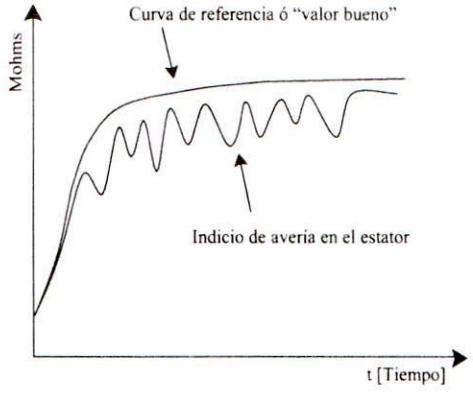


Figura 4.5.8
Evaluación del Índice de Polarización en un motor eléctrico.

Resistencia entre fases. Medir la resistencia entre fases (*desbalanceo resistivo*) desde el circuito de potencia de un motor trifásico, brinda un indicio del estado de anomalías tanto del motor como del circuito.

En lo que respecta al motor, de no existir suficiente aislación, circularán corrientes llamadas *de fuga* que provocan un mal funcionamiento y posterior calentamiento del equipo. En general, el desbalanceo resistivo no debería superar el 5%. Por el contrario, si el responsable de un alto desbalanceo resistivo no es el motor, entonces las causas pueden obedecer a flojedades, desgaste, suciedad o corrosión en elementos constitutivos del circuito de potencia.

Inductancia entre fases. Llamado *desbalanceo inductivo*, permite monitorear el desequilibrio entre los flujos de las corrientes de los bobinados del estator y su calidad. Las excentricidades pueden manifestarse a través de la variación de la inductancia según distintas posiciones de rotor. Un alto desbalanceo inductivo indicaría corto entre espiras del devanado. Los valores de alerta y alarma pueden fijarse en un 4% y 8 % respectivamente.

Un desbalanceo inductivo también es síntoma de deterioro en las barras del rotor.

Capacitancia entre fases. Cuando el valor de capacitancia entre fases (CTG) aumenta, puede sospecharse humedad o suciedad (polvo, aceite, etc.) en los elementos aislantes del estator. Una desviación elevada de este parámetro provocaría descargas eléctricas en la carcasa del motor.

Las pruebas *estáticas* son útiles para identificar algunas fallas sintomáticas; sin embargo, no cubren la totalidad. Es aconsejable complementarlas con inspecciones de campo o *dinámicas*.

4.5.12.2 Técnicas Dinámicas de Inspección

El motor eléctrico debe encontrarse en funcionamiento o energizado.

Voltaje de fases. De la misma forma que lo visto en el punto 4.5.12.1, el monitoreo dinámico de los voltajes de fase puede indicar un síntoma de avería en los circuitos resistivos. Se denomina *desbalanceo de fase*, y nunca es recomendable que el voltaje de una fase varíe en más de un 5% respecto al promedio de las tres. Un alto desbalanceo en los voltajes también puede indicar anomalías en el circuito de potencia del motor.

Por su lado, los picos en el voltaje (en ocasiones provocados por controladores de velocidad o variadores de frecuencia), desgastan prematuramente el circuito de aislación. Estos picos se monitorean con un parámetro denominado *factor de cresta* que representa la diferencia del valor pico de la señal con respecto al valor RMS de la onda completa.

Corriente de fases. Por medio de esta prueba es posible diagnosticar rotura de barras en el rotor, cortocircuito en rotores tipo jaula, alta resistencia entre barras, excentricidad (estática o dinámica) del rotor y cortocircuitos en el estator. Se analiza el espectro en frecuencia de la corriente de alimentación cuando el motor opera bajo carga nominal. Se acepta que la corriente de cada fase no difiera en más de un 3%. No es preciso desconectar el motor del circuito de potencia por lo que las pruebas pueden hacerse a distancia del lugar de operación. El equipamiento necesario para este tipo de monitoreos puede parecer costoso en un principio; sin embargo, los beneficios obtenidos de su aplicación justifican, por lo general, la inversión.

Para obtener diagnósticos acertados es necesario un elevado nivel técnico del inspector.

Corriente de Arranque. El comportamiento del valor eficaz (I_{ef}) de la corriente de arranque en un MEI permite suponer la existencia de averías en el rotor o en el estator, sabiendo que el valor pico de la intensidad en el arranque está entre 6 y 9 veces por encima del nominal (I_n).

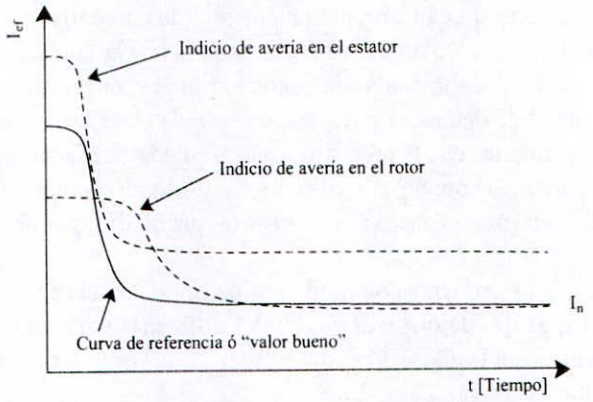


Figura 4.5.9 Evaluación de la corriente de arranque en un motor eléctrico.

Análisis de la calidad de la Energía Eléctrica. La calidad de la energía eléctrica es primordial en el funcionamiento y en la vida de los MEI. Algunos aseguran que más del 25% de los daños sucedidos son causados (directa o indirectamente) por una mala calidad en la alimentación eléctrica. Los modos de falla que inducen averías en los motores, se listan a continuación.

√ Armónicas en el voltaje o en la corriente.
√ Picos de voltaje.
√ Desbalanceo de voltaje y factor de potencia[1] (f_p).
√ Bajos y altos voltajes de alimentación.
√ Contactores averiados.

La presencia de armónicas en la alimentación induce al motor a demandar mayor cantidad de corriente y un exceso en el neutro, lo que a su vez provoca calentamiento y deterioro de la aislación. De la misma forma afecta el factor de potencia.

Los bobinados del estator pueden verse seriamente dañados cuando existen diferencias significativas entre los voltajes de cada fase (*desbalanceo de voltaje*). El resultado es una disminución del torque (debido a corrientes inversas o negativas), y un incremento en la temperatura de operación[2]. Se considera perjudicial en la tensión de alimentación un *desbalanceo de voltaje* mayor al 5% respecto al promedio de todas las fases. Como regla práctica es común considerar que por cada unidad de aumento en el desbalanceo, se produce un incremento porcentual en la temperatura de operación igual a 2 x ($\%_{Desbalanceo}$). Nótese que, con esta relación, un desbalanceo de voltaje del 5% aumenta un 50% el sobrecalentamiento del motor.

Un bajo voltaje aumenta la corriente de alimentación y produce incrementos de temperatura; de la misma manera ocurre si el MEI trabaja con voltajes superiores a la condición de diseño.

Los contactores pueden fallar provocando desbalanceos en las fases o corte en una de ellas; las consecuencias de dichas causas se analizaron con anterioridad.

---

1 El Factor de Potencia (f_p) es la relación Resistencia - Impedancia del circuito.

2 Con sentido práctico es común asumir que por cada 10°C que se incrementa la temperatura de operación, se reduce a la mitad la vida útil del bobinado.

4.5.13 Ensayo de Impedancia en Baterías

Los bancos de baterías constituyen dispositivos de seguridad esenciales para la industria. Se utilizan como redundancias pasivas[1] para accionar circuitos de comando en subestaciones eléctricas, UPS's o cualquier instalación que requiera de energía alternativa para maniobras básicas de emergencia. Bajo estas circunstancias, las baterías se encuentran en situación *pasiva* hasta tanto exista una necesidad de suplir el suministro de energía por algún corte no programado.

Es posible, entonces, efectuar tareas de *inspección basadas en la condición* para lo cual se han desarrollado métodos y tecnología suficientemente útiles que diagnostican estados de falla sintomática en sus partes componentes. Recuérdese que cualquier intervención de mantenimiento realizada sobre equipos de seguridad o de protección requiere garantizar una alta disponibilidad luego de la prueba; este método de medición de impedancias cumple tales requisitos de confiabilidad porque no es preciso retirar de servicio las baterías.

Los instrumentos utilizados aplican una pequeña señal de c.a. entre los bornes de cada celda que no afecta la tensión base. Luego, calculan automáticamente la impedancia, la resistencia de la conexión entre celdas y la tensión c.c. La prueba demanda pocos minutos y los reportes son de fácil comprensión. Es sencillo reconocer el nivel de deterioro porque conforme la batería envejece, su impedancia interna aumenta. Si la impedancia disminuye, la falla sintomática puede obedecer a un corto interno. Se compara el valor de cada impedancia con el promedio del conjunto y/o con especificaciones del fabricante. Las magnitudes de alerta y alarma respecto a la *línea base* (promedio) pueden fijarse inicialmente en 10 y 25% respectivamente.

La figura 4.5.10 muestra los informes de medición de impedancias para dos bancos de baterías. El primero corresponde a un grupo de dos baterías (24V) utilizadas para accionar los comandos de una subestación en caso de emergencia. Obsérvese que ambas celdas muestran una desviación menor al 5% respecto al valor promedio *(average)*.

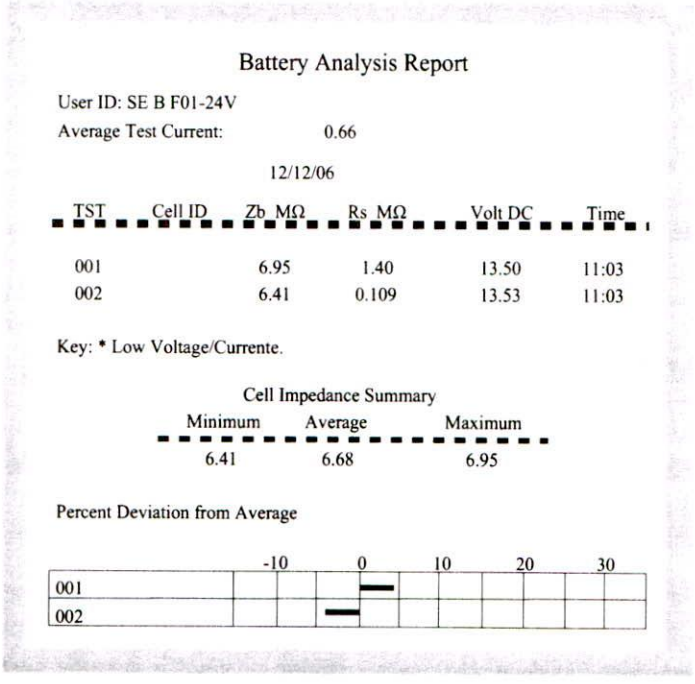


Figura 4.5.10 a) Reporte estándar para el control de impedancias en baterías.

1 *Ver 5.1.1 "Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección" Capitulo 5.*

Battery Analysis Report

User ID: SE B F01-110V
Average Test Current: 0.71

12/12/06

TST	Cell ID	Zb MΩ	Rs MΩ	Volt DC	Time
001		6.79	1.02	12.96	10:49
002		6.68	1.05	12.94	10:50
003		7.36	1.13	13.31	10:50
004		6.76	0.919	12.99	10:50
005		6.78	1.05	12.94	10:51
006		6.91	1.42	12.99	10:51
007		6.81	0.887	12.92	10:51
008		6.68	0.839	12.96	10:52
009		6.34	0.105	12.96	10:52

Key: * Low Voltage/Currente.

Cell Impedance Summary

Minimum	Average	Maximum
6.34	6.79	7.36

Percent Deviation from Average

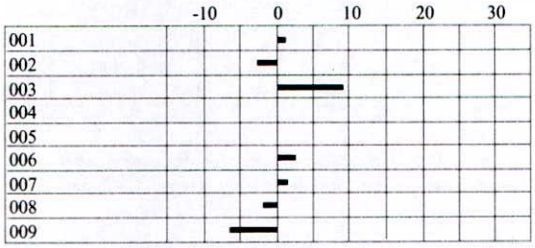


Figura 4.5.10 b) Reporte estándar para el control de impedancias en baterías.

El informe de la figura 4.5.10 b) corresponde a un banco de nueve baterías que suministran 110V. La batería "003" se encuentra próxima a alcanzar valores de impedancia del 10%, mientras que la celda "009" posee síntomas de posible corto interno. La ausencia de datos en "004" y "005" se debe a que los valores de impedancia están extremadamente alejados del valor promedio, lo que denota fallas irreversibles en esos componentes.

La principal ventaja que ofrece esta metodología es no ser invasiva para los elementos, porque no es preciso desconectar los bornes. Téngase en cuenta que las tareas de desconexión, generalmente traen el inconveniente de introducir fallas latentes post-inspección.

4.5.14 Análisis de Gases de Combustión

Medir la emanación de gases o los productos de la combustión en muchas actividades térmicas permite descubrir, con anticipación, desvíos o fallas sintomáticas en los sistemas. Esta tecnología se aplica con éxito en industrias químicas y petroquímicas, en refinerías, en la producción de energía eléctrica, en la industria farmacéutica, en control del medio ambiente, en la optimización de procesos, etc.

El elemento sensor está constituido por una sonda de muestreo sensible al gas (o conjunto de gases) y, en ocasiones, por un tubo Pitot para medir presión diferencial (velocidad).

Análisis de Calderas. Los análisis en calderas de vapor determinan el rendimiento o eficiencia de la combustión a través de la medición de temperatura y nivel de CO_2, SO_3, NO_x y Material Particulado en los gases de salida. La tabla siguiente[1] muestra los valores de alerta y alarma que pueden establecerse para una caldera humotubular que funciona a gas natural. Los límites dependen del tipo de instalación.

---

1 El límite superior de Alarma es el nivel guía para contaminantes presentes en efluentes gaseosos para nuevas fuentes industriales (valor promedio para 1 hora y en funcionamiento normal) según la tabla D del Anexo IV del Decreto reglamentario 3395/96 de la Ley 5965, Provincia de Buenos Aires.

Nivel	CO_2 [mg/Nm³]	SO_3 [mg/Nm³]	Material Particulado [mg/Nm³]	*NOx [mg/Nm³]
Alerta	190 - 230	50 - 70	200 -230	400 - 430
Alarma	230 - 250	70 - 100	230 - 250	430 - 450

NOx expresado como NO_2

Tabla 4.5.4
Valores de alerta y alarma para análisis de gases en una caldera de gas natural.

De todas maneras, estas mediciones no siempre identifican la totalidad de las fallas. Podrán existir anomalías internas en el espectro de temperaturas del horno o producirse acumulación de sedimentos (partículas) que pueden no ser identificadas. Para cubrir mayor cantidad de fallas se acostumbra tomar perfiles de temperatura en los gases de combustión, medir la concentración de partículas o efectuar alguna otra inspección de mayor alcance.

Análisis de Motores de Combustión. Los motores de combustión interna se monitorean con analizadores de gases de escape. La sonda de medición se introduce en la salida del escape o bien antes del convertidor catalítico[1] para evaluar el rendimiento de la combustión. Estos instrumentos analizan la emisión[2] de los gases y diagnostican su composición. Midiendo la concentración de O_2, CO, CO_2 y HC es factible evaluar la eficiencia de la combustión del motor. Algunos instrumentos de tecnología superior miden, además, concentración de NO_x.

Nivel	O_2 [%]	CO [%]	CO_2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]	Lambda (λ) [AFR_{Medido}/AFR_{Ideal}]
Alerta	2	3.5 - 4.5	14,5	800 - 1400	1800	≤ 0.92 ó ≥ 1.10
Alarma	3	> 4.5	16,5	> 1400	2100	≤ 0.88 ó ≥ 1.15

Tabla 4.5.5
Valores de alerta y alarma para gases de escape en un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos antes del catalizador (ensayo a 3.000 rpm).

El parámetro AFR (*Air-Fuel Ratio*) es el indicador utilizado para cuantificar la mezcla inflamable **aire-combustible** (relación de masas). Para motores de gasolina el valor teórico (ideal) resulta 14,7, aunque puede sufrir ligeras diferencias de acuerdo al tipo de combustible. Tal relación indica que son necesarios 14,7 Kg de aire para quemar 1 Kg de combustible.

La relación entre el valor AFR **Medido** y el **Ideal** se conoce como Lambda (λ).

$$\lambda = \frac{AFR_{Medido}}{AFR_{Ideal}}$$

Obsérvese que si el AFR_{Medido} es menor que 14,7 el combustible contenido en la mezcla es superior al ideal (aire insuficiente) y el valor de Lambda (λ) será menor que 1; esto se conoce como mezcla *rica*. Por su parte, cuando el valor AFR_{Medido} es mayor que 14,7 (combustible insuficiente) la mezcla es *pobre* y λ acusará un valor superior a 1.

Una condición de mezcla rica (λ < 1) se manifiesta con altos valores de CO (falta de O_2 en la combustión), mientras que un elevado nivel de oxígeno (O_2) deja presumir un pobre encendido o una pérdida de gases de escape. Por su parte, un alto nivel de HC (hidrocarburos) permite suponer fallas en el sistema de encendido, fugas de aceite o una situación de combustión incompleta.

Análisis de otros Gases. Las tecnologías para analizar gases emitidos por chimeneas son las que estudian la composición química de los gases dispersos en la atmósfera emergente. Los instrumentos disponibles en el mercado son capaces de detectar y medir, por ejemplo, O_2 [%], CO_2 [mg/Nm³], CO [ppm], NO_x [mg/Nm³], SO_3 [mg/Nm³], temperatura de gases [°C], presión diferencial [hPa], velocidad [m/s], punto de rocío en gases [°C], exceso de aire (λ) y rendimiento de la combustión (η) [%].

---

1 Un convertidor catalítico posee un catalizador que elimina, por combustión, las trazas de compuestos como azufre (S), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos residuales (HC), entre otros.

2 En temas relacionados al medio ambiente se define "emisión" a la transferencia de contaminantes desde una fuente a la atmósfera.

Los límites de alerta y alarma deben fijarse en particular para cada caso.

La diversidad de instrumentos capaces de determinar la concentración de gases es cada vez mayor. El principio de medición puede ser espectroscopía infrarroja o ultravioleta, cromatografía, láser o la medición de luz (visible o ultravioleta) reflejada a diferentes longitudes de onda.

4.5.15 Alteración en los parámetros de Calidad del Producto

La sinergia entre las áreas de Producción y Mantenimiento es un factor clave en la industria moderna. Una prueba de ello es utilizar las variables de proceso para detectar, con anticipación, la presencia de fallas sintomáticas en equipos o instalaciones. Las funciones de los equipos generalmente se ven parcial o totalmente afectadas cuando se producen fallas incipientes en sus componentes. Probablemente tales fallas no impidan la ejecución total del producto, pero seguramente afectarán sus propiedades, los parámetros de calidad o simplemente el nivel de productividad. Incluir en los programas de mantenimiento predictivo parámetros sensibles del proceso, es una práctica cada vez más adoptada.

En ciertas empresas es común transferir rutinas de inspección al departamento productivo (operaciones) y, ante el desvío de alguna variable, se comunica inmediatamente al área de mantenimiento quien realiza el seguimiento correspondiente del activo responsable de dicha alteración.

Resumen de aplicación

4.1 Técnicas de Mantenimiento Condicional

- *Resulta conveniente que Mantenimiento sea capaz de interpretar y diagnosticar los resultados obtenidos de los informes predictivos o pro-activos.*

- *Definida la necesidad de monitorear una falla sintomática en su estado prematuro (antes que se transforme en una falla funcional), se requiere seleccionar la herramienta que mejor se ajuste para su detección.*

4.2 Análisis de Vibraciones en tiempo y frecuencia

- *Las vibraciones resultan de la acción y reacción de fuerzas externas e internas del sistema. Si la máquina sufre deterioro en alguna de sus partes, las fuerzas aumentan su intensidad provocando variación en los niveles de vibración.*

4.2.1 Fundamentos

- *Una vibración se produce por el movimiento oscilatorio (generalmente de pequeña amplitud y alta frecuencia) de una masa a través de un punto de equilibrio.*

- *El valor máximo de una señal de vibración se denomina amplitud (A).*

  - √ *Desplazamiento "pico-pico": [micrones] (1 μ = 0,0001 cm.) ó [mils] (1 mils = 0,001 in)*
  - √ *Velocidad "cero-pico" (pK) ó RMS: [mm/seg] ó [in/seg]*
  - √ *Aceleración "cero-pico" (pK) ó RMS: [mm/seg²], [in/seg²] ó [G] (1 G = 9.800 mm/seg²)*

- *El periodo (T) es el espacio de tiempo transcurrido entre dos puntos repetitivos y consecutivos de una onda periódica, dentro del cual los sucesos físicos se reiteran. La inversa del periodo es la frecuencia (f = 1/T); [f] = [cpm ó Hz], e identifica la cantidad de periodos por unidad de tiempo. [T] = [segundo ó milisegundo].*

- *El defasaje temporal (medido en grados) entre dos señales (tomadas en puntos diferentes del equipo) indica el nivel vibratorio relativo que tiene una parte de la máquina con respecto a la otra. [θ] = [grados].*

- *El valor RMS es una magnitud escalar (usada en velocidad y aceleración) que brinda un panorama inicial del estado de gravedad de la máquina, siempre que el rango de frecuencia sea el mismo para todas las mediciones.*

- *La medición del valor global de una señal vibratoria en el dominio del tiempo es un parámetro general. Pueden confeccionarse rutas sólo para el monitoreo de valores globales y, ante la evidencia de una magnitud fuera de lo normal, se procede al estudio de los parámetros singulares.*

4.2.2 Diagramas de Espectro (Dominio de las frecuencias)

- *Las curvas de amplitud en función de la frecuencia se denominan espectros. Analizar un espectro consiste en interpretar un hecho físico acontecido en una máquina rotante.*

- *Los componentes de una cadena cinemática en movimiento rotatorio generan, aún en estado normal de operación, vibraciones en frecuencias específicas. Cuando surge un daño, las vibraciones se excitan elevando los valores (amplitudes) a niveles mayores.*

- *Los eventos que emiten mayor energía se presentan en baja frecuencia (eje torcido, desalineación, desbalanceo, problemas estructurales, etc.); mientras que los de menor energía ocurren casi siempre a frecuencias mayores (daños en cojinetes antifricción, engranajes, motores eléctricos, cavitación en bombas, etc.).*

- *Las frecuencias vibratorias específicas de los elementos nos ayudan a comprender el origen del problema; mientras que la amplitud nos provee indicios de la gravedad del mismo.*

- *Sabiendo que ciertos problemas ocurren a frecuencias específicas, es posible establecer una relación entre la frecuencia y la parte del equipo o efecto físico manifiesto. El desbalanceo, por ejemplo, provoca su máxima amplitud en velocidad a 1X; es decir, a una frecuencia similar a la velocidad de rotación del eje (1X = 1 x rpm en CPM ó Hz).*

4.2.3 Instrumentos de Medición

- *Un senso-transductor es un instrumento provisto de electrónica que transforma un parámetro físico en una señal eléctrica. El sensor apoyado sobre la máquina vibra solidariamente con ésta y toma los datos necesarios (velocidad y aceleración) para medir y representar la señal.*

4.2.4 Geometría de las Mediciones

- *Cada punto del equipo a medir puede tener más de una medición, y cada una debe respetar criterios de ortogonalidad. Lo habitual es efectuar dos lecturas radiales a 90° (vertical y horizontal) y una axial horizontal; para máquinas con disposición horizontal, dos mediciones radiales a 90° (frontal y transversal) y una axial vertical.*

- *Una Ruta de Equipo (para recolección de datos vibratorios) se confecciona en el sentido que se transmite la potencia; es decir, desde los componentes conductores hacia los conducidos.*

4.2.5 Diagnóstico

- ***Desbalanceo**. El desbalanceo ocurre cuando el eje central de masa no coincide con la línea central geométrica del cuerpo. Se identifican tres tipos: estático (rotores no esbeltos, largo < 50% del diámetro), cupla (rotores esbeltos) y dinámico (combinación de los dos primeros). Se trata de un fenómeno de alta energía y baja frecuencia (1X de las rpm).*

- ***Desalineación Angular**. Ocurre cuando los ejes (conductor – conducido) unidos por acople, no son paralelos. Internamente se induce una fuerza que tiende a doblar los ejes. Si se presenta sólo este tipo de desalineación, genera una amplitud axial elevada en 1X y 2X. A ambos lados del acoplamiento, la fase de las mediciones axiales se ubican a 180°.*

- ***Desalineación Paralela**: Ocurre cuando los ejes (conductor – conducido) son paralelos pero desplazados. La desalineación paralela pura causa una amplitud radial elevada en 2X (se produce una vez por cada dos vueltas de eje). El defasaje, a través del acoplamiento de las mediciones radiales, es 180°. Cuando se mide una diferencia de fase de aproximadamente 180° tanto en Axial como Radial, la desalineación es angular y paralela.*

- ***Eje doblado**. Situación similar a la desalineación angular. Se presenta fundamentalmente en rotores o ejes largos (esbeltos). Las mediciones axiales en los extremos del eje se encuentran desfasadas 180°; por su parte, las radiales están en fase.*

- ***Resonancia***. *Si alguna de las frecuencias de excitación coincide con las frecuencias naturales del sistema, aumenta considerablemente la amplitud de los eventos. La velocidad crítica de una máquina rotante es aquella cuya frecuencia de giro (rpm) se hace coincidente con la frecuencia natural.*

- ***Solturas Mecánicas***. *Producen gran cantidad de armónicas, inclusive subarmónicas en 1/2 X de las rpm. Las amplitudes de las armónicas son de consideración, pero van decreciendo conforme aumenta la frecuencia.*

- ***Oil Whirl***. *En cojinetes de fricción con ejes que operan a altas velocidades. Se manifiesta entre 1/3X y 1/2X de las rpm (ligeramente < a 1/2X).*

- ***Excentricidad***. *Ocurre una excentricidad cuando el centro geométrico de una polea o engranaje no coincide con el centro de rotación del sistema. Se manifiesta por elevado valor radial en 1X (de las rpm de la polea excéntrica) y en la dirección imaginaria que une los centros de las poleas conductora y conducida.*

- ***Problemas en correas ó bandas***. *Poleas flojas o con excesivo desgaste se manifiestan siempre a frecuencias menores que la de rotación. Además, generan varias armónicas (hasta 4X) de la frecuencia de paso de las correas (f_{Pc}).*

- ***Problemas de flujo***. *Es posible identificar problemas de este tipo a la frecuencia de paso de flujo (f_{Pf}) que se obtiene como el producto del número de aspas, alabes (paletas) de impulsores, ventiladores, etc., y la frecuencia de rotación del eje conductor.*

- ***Problemas en Motores Eléctricos***.

  - Factores Mecánicos: Problemas en rodamientos (daños incipientes), desbalanceo y resonancia (se analizan los espectro alrededor de la frecuencia 1X de las rpm) y barras del rotor dañadas o fisuradas (generan corriente asimétrica y por ende una excentricidad en el rotor del tipo rotacional).
  - Factores Electro-Magnético. Corto en el bobinado del estator (el eje del rotor gira en una posición fija pero desplazado respecto al centro magnético del estator) y pulsos torcionales (introducen vibraciones de baja amplitud que pueden excitar frecuencias de resonancia. Los síntomas de falla en rotor y estator tienen un carácter sutil, y cualquier interpretación errónea conduce a diagnósticos desacertados.

- ***Problemas en transmisión de engranajes***. *De producirse desperfectos mecánicos en los dientes, es de esperar armónicas de la frecuencia de engrane (n° dientes x rpm) de mayor amplitud en el tren dañado. Suele aumentar el valor de las armónicas en 3X del tren dañado.*

- ***Problemas en rodamientos***. *Un rodamiento puede presentar fallas por: lubricación insuficiente, fatiga de superficies deslizantes, contaminación del lubricante, cargas elevadas (desbalanceo, desalineación, eje doblado, etc.), montaje inapropiado, obsolescencia, defectos de fabricación, etc. Los rodamientos tienen frecuencias naturales específicas propias de sus parámetros geométricos (diámetro de bolilla, diámetro medio, número de bolillas y ángulo de contacto). Se estudia el espectro e identifican los picos en cada una de estas frecuencias.*
  Se han encontrado alternativas como la detección de la energía espectral emitida (SEE) o energía acústica emitida, que indica el estado general del rodamiento procesando únicamente los efectos de alta frecuencia. Por su parte, la técnica de Demodulación o Envolvente de Aceleración y la técnica del Peakvue (valor de pico) resultan útiles para rodamientos de baja velocidad.

- ***Análisis orbital***. *Una alternativa para observar el comportamiento de ejes montados en cojinetes de fricción (lubricación hidrodinámica), es el análisis de órbita. Ubicando dos sensores de proximidad*

(corriente de eddy) a 90° en los extremos de apoyo, se puede evaluar la trayectoria media descripta por el centro del eje en un plano transversal al eje de rotación.

- *Ver Tabla 4.2.4.*

4.2.6 Valores de Operación y Diagnóstico (Nominal, Alerta y Alarma)

- *Cada punto de medición debe tener (para todos los parámetros medidos) un valor de referencia que será ajustado en función de la experiencia del analista. Lo habitual es establecer la magnitud de buen funcionamiento (valor nominal) y comparar todas las lecturas consecutivas con dicho valor, siempre bajo las mismas condiciones de operación.*

4.2.7 Consideraciones y Recomendaciones Finales

- *Reunir toda la información necesaria y definir las frecuencias características de cada elemento.*
- *Seleccionar los parámetros de salida, definirlos y encontrar los valores nominales, alerta y alarma.*
- *Asegurar que el intervalo Δt_{SF} exista en todos los casos y que la recolección de datos reúna dos características: alta repetibilidad y alta densidad de información.*
- *Colocar el senso-transductor lo más cerca posible de los elementos a controlar.*
- *Para la instalación de nuevos activos, realizar siempre un test de aceptación.*
- *Mantener actualizados los gráficos de tendencias; en máquinas prioritarias se aconseja llevar una gestión visual a través de gráficos publicados en las cercanías del activo.*
- *Complementar los análisis espectrales con maniobras proactivas de alineación y balanceo.*

4.3 Termografía Infrarroja

- *La termografía infrarroja detecta fallas sintomáticas analizando el espectro de temperaturas de la superficie de los cuerpos.*

4.3.1 Alcance y objetivos de la Termografía Infrarroja

- *Se aplica en disciplinas como astronomía, medicina e ingeniería. Pueden identificarse fallas sintomáticas severas sin afectar la continuidad operativa de la máquina.*
- *Objetivos: Detectar fallas sintomáticas y reducir costos ocultos por lucro cesante y costos directos de mantenimiento.*

4.3.2 Transmisión del Calor

- *La energía térmica (calor) se transmite de tres maneras diferentes.*

- Conducción. El calor fluye en el interior de los cuerpos por agitación térmica de sus moléculas y sin transporte de materia, en el sentido de las temperaturas decrecientes.
- Convección. El calor se transmite a través de los fluidos en movimiento.
- Radiación. La energía se transmite por ondas electromagnéticas que, al incidir sobre la superficie de los objetos, elevan su temperatura.

4.3.3 Espectro Electromagnético

- *El conjunto de todas las radiaciones electromagnética del universo conocido, se denomina espectro electromagnético. El fenómeno de radiación transporta energía y dicho transporte se lleva a cabo por medio de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz.*

- *La teoría física ondulatoria establece que toda onda electromagnética que se propaga en el vacío queda definida por su longitud de onda (λ_0) y su frecuencia de oscilación (f); el producto de ambas es la velocidad de la luz en el vacío (c_0), aproximadamente 3 x 10^5 Km/seg.*

- *El espectro electromagnético se divide en tres partes: **Anterior al visible** (Rayos X, ultravioleta, etc.) que agrupa las radiaciones con longitudes de onda inferiores a 0,38 μm., **Visible** (detectable por la retina), constituido por las radiaciones cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 0,38 y 0,76 μm aproximadamente y, **Posterior al visible** (infrarrojo, microondas, radio, etc.) cuyas longitudes de onda son superiores a 0,76 μm.*

- *Todo cuerpo cuya temperatura es mayor al cero absoluto (0 °K=-273,16 °C) emite energía (calor) por radiación.*

- *El espectro infrarrojo se divide en tres subregiones: Infrarrojo cercano o de onda Corta (RI-C), Infrarrojo Medio (RI-M) e Infrarrojo Lejano o de onda Larga (RI-L).*

4.3.4 Radiación Térmica

- *Toda onda electromagnética cuya longitud de onda se encuentra entre 0,76 y 10μm, corresponde al espectro infrarrojo (RI). Onda Corta RI-C (0.76 a 2 μm), Onda Media RI-M (2 a 4 μm) y Onda Larga (4 a 10 μm).*

- *La energía térmica emitida por un cuerpo se llama energía radiante o radiación térmica, y es función de su temperatura; cuanto más caliente está el objeto, mayor es la energía que emite por radiación.*

- *A baja temperatura (< 600 °C) la energía radiante emitida tiene longitudes de onda en la subregión del infrarrojo (0,76 a 10 μm). Conforme el cuerpo se calienta, emite radiaciones más intensas de menor longitud de onda que pertenecen a la extremidad roja del espectro (los cuerpos por encima de esta temperatura adquieren un color rojizo y se dejan ver térmicamente).*

4.3.4.1 Ley de Planck

- *Cuando un cuerpo se calienta emite isotrópicamente energía térmica desde su superficie, y la cantidad de energía que radia es función de su temperatura y de la longitud de onda.*

- *Se llama cuerpo negro a aquel que en equilibrio térmico es capaz de emitir o absorber la máxima energía térmica por unidad de superficie para un valor dado de temperatura.*

- *La longitud de onda a la que se alcanza el máximo valor de radiación, disminuye conforme aumenta la temperatura del cuerpo (ley de los desplazamientos de Wien).*

4.3.4.2 Ley de los desplazamientos (Ley de Wien)

- *Surge de buscar el máximo valor de emitancia espectral dada por la ley de Planck. Se obtiene, así, la longitud de onda a la que un cuerpo emite mayor radiación para cada temperatura; o lo que es lo mismo, la variación de la longitud de onda con la temperatura de la superficie radiante.*

4.3.4.3 Ley de Stefan-Boltzmann

- *Relaciona la energía radiante emitida por el cuerpo con la temperatura. Permite evidenciar que con bajos valores de temperatura la potencia emitida por radiación térmica puede ser baja; sin embargo, aumenta conforme lo hace la temperatura a la cuarta potencia.*

- *La potencia radiante por unidad de superficie para un cuerpo gris, es la misma que la de un cuerpo negro a la misma temperatura, sólo que reducida proporcionalmente en el valor de emisividad espectral de dicho cuerpo.*

4.3.5 Cámaras para Termografía (principio de funcionamiento)

- *Las cámaras de termografía (termocámaras) analizan un área completa (imagen) y brindan la posibilidad de evaluar su heterogeneidad térmica. No miden temperatura en forma directa; miden la radiación emitida por el objeto focalizado en un rango de longitudes de onda predeterminado (subregión del infrarrojo) y luego, a través de algoritmos, construyen la imagen térmica del objeto.*

- *La emisividad varía considerablemente según el material y su terminación superficial. Si bien existen tablas para una gran variedad de materiales, es conveniente que el termógrafo ajuste el parámetro directamente en campo.*

- *Cuando es necesario tomar imágenes infrarrojas desde fuera de los recintos cerrados, se utilizan ventanas infrarrojas transparentes a la radiación infrarroja (distintas al vidrio común).*

4.3.6 Ventajas y Desventajas de la Termografía Infrarroja

Ventajas	Desventajas
No es necesario retirar de servicio los equipos; el análisis se realiza a una distancia de seguridad reduciendo significativamente los riesgos de accidente.	No permite realizar mediciones de gran exactitud. Para ello es necesario conocer los parámetros físicos, geométricos y ópticos del contexto.
Permite mediciones on-line porque los sensores infrarrojos presentan un tiempo de respuesta pequeño a la radiación térmica (microsegundos).	Si la falla interna del elemento no se manifiesta externamente por aumento de temperatura, será imposible detectarlo. Sólo se miden temperaturas superficiales.
Ideal para situaciones de extrema temperatura y objetos alejados o en movimiento.	Los reflejos de los rayos solares pueden enmascarar o confundir defectos.
Permite identificar la presencia de elementos defectuosos en forma masiva, a diferencia de la pirometría que sólo mide la temperatura puntual e instantánea.	
Se reducen significativamente los cortes no programados. (Mantenimiento de Emergencia).	

Ventajas y Desventajas de la Termografía Infrarroja.

4.3.7 Aplicaciones y Diagnóstico

4.3.7.1 Sistemas Eléctricos

- *Componentes e instalaciones de maniobra para baja, media y alta tensión.*
- *Subestaciones y líneas de transporte de baja, media o alta tensión.*
- *Paneles interruptores, seccionadores, llaves interruptoras, conexiones y fusibles.*
- *Cables, empalmes y tableros. Equipamiento para la distribución eléctrica en general.*
- *Transformadores de potencia, barras de transporte, centro de control de motores (CCM).*
- *Máquinas eléctricas como generadores, motores eléctricos o variadores.*
- *Borneras de motores y generadores, paneles de comunicación e instrumentación.*
- *Detección de pérdidas por inducción magnética, etc.*

4.3.7.2 Sistemas Mecánicos

- *Reductores, sistemas de transmisión y transportadores.*
- *Rodamientos, poleas, acoplamientos, engranajes y correas.*
- *Motores eléctricos, bombas, ventiladores, compresores y soplantes.*
- *Maquinas rotativas, motores de combustión interna y turbomáquinas.*

4.3.7.3 Materiales Refractarios - Aislantes

- *La inspección en recubrimientos refractarios o aislaciones se basa en el hecho de que si existe una temperatura homogénea dentro de un recipiente, la temperatura exterior de la superficie es función directa de la transmisión del calor por conducción a través de la aislación y la pared del recipiente. Tanto la humedad que pudiera haber en la aislación como su desgaste desigual, son localizables.*

4.3.7.4 Procesos Industriales - Sistemas de Vapor

- *Intercambiadores de calor y torres de enfriamiento.*
- *Soldaduras y tratamientos térmicos.*
- *Válvulas para líquidos o vapor, trampas y líneas de vapor.*
- *Tanques de almacenamiento y tuberías subterráneas.*
- *Instalaciones frigoríficas, reactores y condensadores.*

4.3.7.5 Infraestructura - Construcciones - Edificios

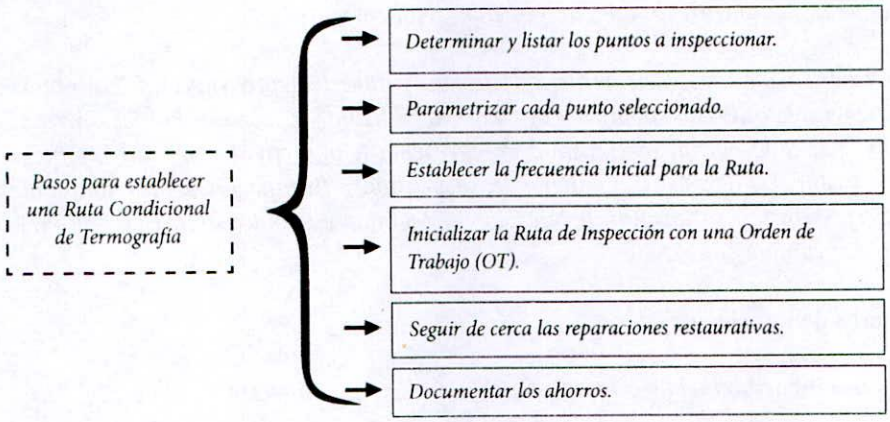
- *Condición y eficiencia de aislaciones térmicas en edificios o viviendas.*
- *Evaluación y verificación de humedad.*
- *Verificación de heterogeneidad en materiales como concreto o adhesivos.*
- *Determinación de pérdidas o ingreso de aire en edificios.*
- *Localización de fisuras en paredes y techos.*
- *Ubicación de pérdidas en cañerías empotradas o enterradas.*

4.3.7.6 Otras aplicaciones

- *Cavidades e inclusiones en sólidos.*
- *Detección de corrosión, mezclas y aleaciones.*
- *Inspección de la integridad estructural en vehículos.*
- *Falta de adhesión, espesor, porosidad u oclusión de aire en materiales compuestos.*

- *Evaluación de uniones y empalmes metálicos.*
- *Acumulación de sarro o incrustaciones en tuberías.*
- *Grado de adherencia en pinturas o recubrimientos.*

4.3.8 Recomendaciones para programar una Ruta de Termografía



Pasos recomendados para implementar una Ruta Condicional de Termografía.

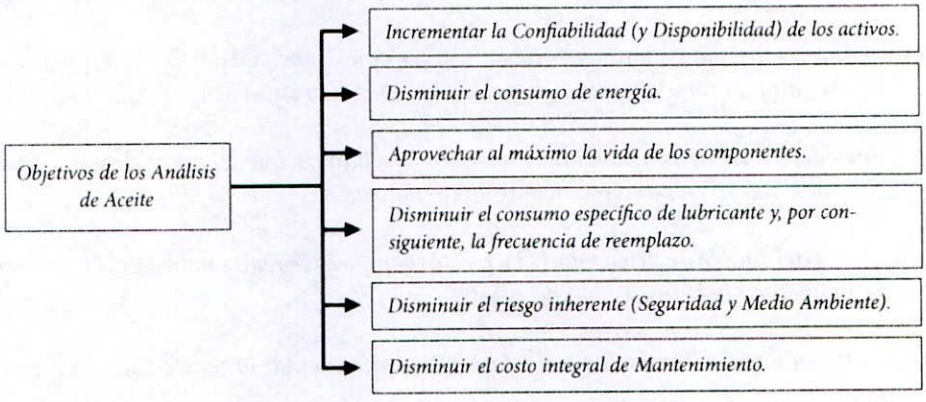
4.4 Tribología y Análisis de Aceites

- *La tribología es una ciencia integradora que se ocupa de controlar y minimizar el desgaste por fricción entre elementos de máquinas.*

4.4.1 Alcance de los Análisis de Aceite

- *Todo mecanismo que utilice para su funcionamiento un lubricante, puede ser objeto de controles periódicos. Cojinetes de rodamiento, turbinas de vapor y gas, bombas, reductores, sistemas hidráulicos, compresores de aire y frigoríficos, motores de combustión, transformadores de distribución eléctrica, trenes de engranajes, etc. son máquinas sobre las cuales puede efectuarse un estudio del lubricante con resultados satisfactorios.*

4.4.2 Objetivos y Fallas Sintomáticas



Principales objetivos de un análisis de aceite.

4.4.3 Introducción a la Lubricación

- *La propiedad fundamental de un lubricante es su viscosidad (en grasas la consistencia), y la función primaria es mantener separadas las superficies en movimiento; es decir, controlar la fricción disminuyendo el desgaste producido por rodadura, rotación o deslizamiento relativo.*

- *La fuerza de fricción depende de la carga aplicada y del estado (rugosidad) de las superficies. También depende del área real de contacto entre los dos cuerpos en movimiento.*

- *La carga lubricante debe reducir el desgaste abrasivo (fricción) y adhesivo entre superficies con movimiento relativo, mantener separadas las superficies de contacto deslizante reduciendo la fricción, transferir y disipar el calor generado por los mecanismos en operación (conductividad térmica), proteger las superficies contra sustancias agresivas, mantener en suspensión y transportar los contaminantes hacia los filtros, en ciertas ocasiones transmitir potencia, evitar el ataque químico sobre elementos y, en aceites dieléctricos, aislar componentes.*

4.4.4 Formulación y clases de Lubricantes

- *Muchos de los aceites usados actualmente son formulados con una base mineral.*

- *Los aceites sintéticos tienen base sintética. Se obtienen por síntesis química y el resultado es un compuesto base cuyas moléculas son "clones" de un modelo molecular diseñado con características particulares para cada necesidad. Las familias más comunes son: Polialquilen glicol (PAG's ó Poliglicol), PAO's (Estructura polialfaolefina / Hidrocarburo sintético), Esteres dibásicos ácidos (DI's), Ester Poliesteres, Siliconas y Esteres fosfóricos.*

4.4.5 Aditivos

- *Son compuestos que se incorporan al aceite base con el fin de dotarlo de ciertas cualidades y características necesarias para un desempeño satisfactorio en el tiempo.*

- ***Antioxidantes**. Tienen la función de retrasar el proceso de oxidación (envejecimiento) inhibiendo la formación de radicales libres y peróxidos.*

- ***Inhibidores de Corrosión**. Forman una película polar adherente y delgada sobre las superficies metálicas. Siendo que la película repele el agua, evita o inhibe el ataque corrosivo.*

- ***Antiespumantes**. Ayudan a mantener elevada la tensión superficial del fluido. Esto hace que las burbujas de aire se rompan rápida y fácilmente cuando llegan a la superficie.*

- ***Depresores del punto de congelación**. Previenen la solidificación del aceite disminuyendo la temperatura a la cual el fluido presenta problemas de circulación.*

- ***Mejoradores del Índice de viscosidad (IV)**. Estos compuestos reaccionan con el incremento de la temperatura manteniendo la viscosidad del aceite.*

- ***Extrema Presión (EP)**. Tienen la particularidad de incrementar la resistencia a la carga de la película lubricante.*

- ***Sólidos suspendidos o dispersos** como el disulfuro de Molibdeno (MOS_2) forman una película protectora y resistente al desgaste adhesivo.*

- ***Antidesgaste (AD).*** *Son elementos polares de protección para las superficies metálicas.*

- ***Dispersantes.*** *Su función es maximizar el tiempo de suspensión de las partículas.*

- ***Detergentes.*** *La primera función es controlar los depósitos y, la segunda, neutralizar los ácidos generados por la combustión que provocan corrosión.*

- ***Desactivadotes de metales.*** *Encierran a las partículas metálicas (polares) para desactivarlas químicamente e inhibir su capacidad de generar ácidos disueltos.*

4.4.6 Análisis Tribológicos (Base + Aditivo + Máquina + Medio)

4.4.6.1 Viscosidad Cinemática e Índice de Viscosidad (IV)

- *Cuando se analiza viscosidad siempre debe referirse a un valor de temperatura. Por ejemplo, un aceite ISO 68 posee aproximadamente 68 cSt a 40 °C y 8 cSt a 100 °C.*

- *El índice de viscosidad (IV) representa la variación de la viscosidad con la temperatura (entre 40 y 100 °C).*

4.4.6.2 Acidez y Basicidad

- *Con el índice de acidez (TAN) se monitorea la degradación o envejecimiento del aceite.*

- *El TBN mide el nivel de reserva alcalina del paquete de aditivos.*

4.4.6.3 Oxidación

- *Los factores externos que más aceleran el proceso de oxidación son: calor, alta temperatura de funcionamiento, agua, aire, catalizadores metálicos (partículas de cobre y acero).*

4.4.6.4 Densidad

- *Su incremento podría indicar: contaminación con agua o partículas, mezcla o contaminación con aceites sintéticos (mayor densidad), oxidación elevada, pérdidas por evaporación, contaminación con refrigerantes y alto contenido de hollín.*

4.4.6.5 Agotamiento y Monitoreo de Aditivos

- *Las principales causas del agotamiento de aditivos son: el agua, el calor y los contaminantes sólidos.*

4.4.6.6 Contaminantes Sólidos

- *Cuando las partículas (impurezas) ingresan al sistema sufren un proceso de fragmentación y propagación. Las más grandes se multiplican generando un número mayor de partículas de menor tamaño. Algunas irán a los filtros y otras, desafortunadamente, se sedimentarán.*

- *Las características más perjudiciales de una partícula son la cantidad, el tamaño y su dureza. La dureza aumenta conforme disminuye su tamaño.*

- *El código de limpieza ISO 4406 se usa para cuantificar la concentración de partículas metálicas y no metálicas (cantidad y tamaño) que existe en un aceite. La técnica arroja tres números que representan la cantidad de partículas iguales o mayores a 4, 6 y 14 micrones respectivamente (de izquierda a derecha).*

4.4.6.7 Parámetros Generales de Diagnóstico

- *Un informe proactivo debe incluir un detalle con la concentración de cada elemento químico detectado en la muestra. Al momento de fijar valores de alerta y alarma (superior e inferior), es útil tener presente su origen.*

4.4.7 Parámetros Específicos de Diagnóstico

- ***Aceites para motores de combustión**. Sobresalen las siguientes variables de monitoreo: Glicol, TBN, contaminantes atmosféricos, cenizas sulfatadas y análisis de partículas.*

- ***Aceites para transmisión de engranajes**. El aceite debe reducir el desgaste logrando buena adherencia sobre los dientes. La viscosidad y los agentes de oleosidad contribuyen a lograr esta función adhiriéndose a las superficies y minimizando el contacto entre ellas, principalmente en engranajes con velocidad de rotación baja. Es útil monitorear: tendencia a la espumación, vida útil remanente, TAN, elementos de desgaste, Timken®, conteo de partículas (ISO 4406).*

- ***Aceites para turbinas**. Dentro de las funciones principales de un aceite de turbina se encuentra la lubricación de los mecanismos como cojinetes y eje. Sobresalen los análisis de: punto de inflamación, estabilidad a la oxidación / Vida útil remanente, poder demulsificante, demulsibilidad, oxidación, antiherrumbre, tendencia a la espumación y conteo de partículas (ISO 4406).*

- ***Aceites para compresores**. Los aceites para lubricar compresores se formulan para reducir el desgaste, la corrosión y el riesgo de explosión. Se monitorea: viscosidad, antiherrumbre, cenizas sulfatadas, residuo carbonoso, temperatura de autoignición, agua y conteo de partículas (ISO 4406).*

- ***Aceites para compresores frigoríficos**. Los aceites están sujetos a grandes cambios de temperatura y, normalmente, entran en contacto con los gases que ocupan el circuito de frío en distintas condiciones de presión y temperatura. Los aditivos juegan un rol fundamental bajo estas condiciones de operación. Se monitorea: residuo carbonoso, índice de acidez (TAN), índice de saponificación, punto de congelación y contenido de agua.*

- ***Aceites para sistemas hidráulicos**. Los fluidos hidráulicos, además de transmitir potencia, protegen al sistema. Debe monitorearse: viscosidad, antiherrumbre, índice de acidez (TAN), cenizas sulfatadas, tendencia a la espumación y conteo de partículas (ISO 4406).*

- ***Aceites para transformadores**. Los transformadores utilizan aceite dieléctrico en su interior. De todos los parámetros sensibles de monitoreo se destacan: viscosidad a 40°C, color, contenido de agua, rigidez diélectrica, número de neutralización, tensión interfacial y tangente delta.*

4.4.8 Ensayos sensoriales de campo

- *Ensayo con papel secante. Consiste en verter dos gotas de aceite sobre un papel secante del tipo Whatman® y observar su apariencia final. Un círculo negro bien definido en el centro de la mancha indica alta carga de hollín o falla del aditivo dispersante. Si hay dilución por combustible se presenta un halo de color más claro alrededor de la gota central de aceite. Cuando la periferia de la mancha adopta una forma de estrella (patas de araña), indica la presencia de agua en el aceite.*

- ***Prueba de sedimentación***. *Se deja asentar la muestra en envases transparentes y, luego de dos o tres días, se observa el fondo. Se coloca debajo del recipiente un imán para favorecer la deposición de las partículas. En el fondo se depositan principalmente las partículas metálicas más grandes (> 20 μm) y las no metálicas superiores a 50 μm.*

- ***Ensayo partículas ferrosas***. *Tomar una muestra y agitar fuertemente para homogeneizar todo el contenido del envase. Mezclar parte del aceite con querosene previamente filtrado en una dilución del 10% de aceite en un frasco de fondo plano. Apoyar el envase con la muestra sobre un imán y revolver durante 2 minutos. Sin quitar el imán, y después de 10 minutos, volcar la mezcla procurando que las partículas del fondo queden en el recipiente. Agregar 50 ml de querosene y filtrar con papel Whatman®. Analizar detenidamente las partículas con la ayuda de un microscopio observando tamaño, morfología, color, etc.*

- ***Inspección del color***. *La comparación periódica del color del aceite es una prueba importante, aunque relativa.*

- ***Ensayo de Crepitado***. *Se calienta una superficie metálica (plancha metálica) a 160 °C. Luego, se arrojan dos gotas de aceite y se evalúa su reacción. El crepitado se manifiesta como ruido a "fritura" o "chasquido". Si el chasquido es perfectamente reconocible (visible y audible) existe agua emulsionada en el aceite con una concentración mayor a 0,1%.*

- ***Prueba de olor***. *La contaminación con algún tipo de combustible o solvente, propiciará un olor característico a ese producto. Un olor desagradable del tipo agrio (semejante a huevo podrido) puede ser indicio de contaminación con agua y crecimiento bacteriano. Olor a comida quemada indicaría falla térmica, presencia de lodos y barniz u oxidación (agotamiento de aditivos).*

4.4.9 Precauciones durante el muestreo

- *Las muestras deben ser representativas del estado tribológico del sistema y no deben sufrir alteraciones durante la extracción, transporte y manipuleo.*

4.4.10 Grasas Lubricantes

4.4.10.1 Funciones y Propiedades de las grasas

- *Dentro de las funciones se destaca la separación de las superficies en contacto y cargadas. Además, deben tener la capacidad de contar con buen poder lubricante para separar las superficies en contacto, resistir los impactos, las altas temperaturas, el agua y otros contaminantes líquidos o sólidos, mantener la consistencia y estabilidad físico-química, proteger los mecanismos contra la corrosión y la herrumbre, poseer buena estabilidad al almacenamiento y mantener todas sus propiedades durante el tiempo de operación.*

4.4.10.2 Formulación y Tipos de grasas

- *Las grasas se componen de un aceite base (mineral o sintético), un agente espesante que le otorga consistencia y un paquete de aditivos balanceado que le confiere propiedades especiales.*

4.4.10.3 Lubricación de Rodamientos y Cadenas

- *Muchos rodamientos se lubrican con grasa. Esto permite intervalos prolongados entre relubricaciones y, además, diseños más sencillos. La cantidad de grasa es un factor clave para su desempeño y depende del tamaño, velocidad y tipo de rodamiento.*

- *Las cadenas se utilizan para transmitir potencia. Los aceites o grasas usados para su lubricación, deben tener gran adherencia en todo momento. Se requiere, además, que el lubricante sea muy resistente a la contaminación con polvos, partículas, agua, vapor o a los efectos de la alta temperatura y presión de trabajo.*

4.4.10.4 Parámetros de Diagnóstico para grasas lubricantes

- *Los parámetros de diagnóstico más importantes son: consistencia, punto de gota, viscosidad aparente o bombeabilidad, sangrado, resistencia al agua, capacidad antidesgaste, carga de soldadura (ensayo de 4 bolas) y capacidad de carga (Ensayo Timken®).*

4.4.11 Manejo y almacenamiento de Lubricantes

- *Procurar un almacenamiento bajo techo en áreas limpias, ventiladas y con baja humedad. Los tambores puestos horizontalmente en cunas, deben tener las bocas dispuestas de manera horizontal para lograr que el propio lubricante selle el ingreso de humedad.*

4.5 Otras Técnicas Condicionales

4.5.1 Los Sentidos Humanos

- *Los sentidos humanos pueden identificar: Olores fuera de lo normal, pérdidas de lubricantes o fluidos, niveles de temperatura anormales, fugas en cañerías o conexiones, vibraciones y ruidos extraños, estado de limpieza, variables de proceso fuera de los valores normales, estado de corrosión de partes y componentes, control de deformaciones o fisuras en materiales, etc.*

4.5.2 Estetoscopía Industrial

- *El estetoscopio industrial se utiliza para escuchar fallas en cojinetes de motores, engranajes, sistemas hidráulicos o cualquier otro sistema mecánico.*

4.5.3 Emisión Acústica

- *Se trata de un ensayo no destructivo que identifica las señales emitidas por las discontinuidades internas cuando los cuerpos se tensionan, cargan o someten a esfuerzos. El estado tensional que se logra mediante la aplicación de una carga progresiva, induce en los defectos ocluidos ondas elásticas ultrasónicas detectables por sensores y analizadores de EA.*

- *El método localiza deformaciones plásticas, grietas, corrosión, ruptura de oclusiones o fugas, prácticamente en cualquier tipo de estructura sujeta a esfuerzos o cambios de temperatura como tanques, tuberías, recipientes de presión, etc.*

4.5.4 Prueba Hidráulica y Neumática

- *Es preciso someter la instalación a una presión superior a la del diseño. Sus objetivos son comprobar la hermeticidad de la instalación y verificar su resistencia.*

- *Se llena el sistema con agua u otro fluido (no corrosivo, ni tóxico, ni explosivo) y se incrementa la presión con la ayuda de una bomba de acuerdo a un procedimiento preestablecido.*

4.5.5 Ultrasonido (por excitación Natural)

- *La tecnología industrial predictiva de ultrasonido (US) por excitación natural, puede medir fuentes sónicas propagadas por el aire de hasta 100 kHz (alta frecuencia). Se aplica con éxito para detectar fugas de presión o vacío, averías mecánicas, obstrucciones, desgaste o fallas incipientes en sistemas eléctricos, a través de la variación de los parámetros sonoros del componente escuchado.*

4.5.6 Ultrasonido (por excitación de Eco Ondas)

- *Se utiliza para medir espesores o para detectar discontinuidades tales como fisuras, defectos ocluidos, poros, errores de soldadura, cambios de material, variación en la concentración de líquidos, falta de adhesión entre materiales, defectos superficiales, grado nodular de una fundición, heterogeneidad en el curado estructural de hormigón o altas temperaturas.*

- *La señal o pulso ultrasónico (de 200 kHz a 25 MHz) es enviado por un emisor de US (palpador) de alta sensibilidad desde la superficie de la pieza hacia su interior quien, además, recibe el rebote y lo canaliza electrónicamente hacia un analizador especial u osciloscopio.*

4.5.7 Tintas Penetrantes

- *Las grietas o microfisuras que emergen a la superficie (imperceptibles a simple vista) son fallas sintomáticas que, en ocasiones, anteceden al colapso estructural. Tal situación de potencial falla funcional puede evidenciarse aplicando tintas penetrantes. Se utiliza en fuselajes, estructuras portantes, ejes de turbina, álabes, hélices, soldaduras, calderas, tanques metálicos, etc.*

4.5.8 Partículas Magnéticas

- *Consiste en magnetizar la pieza para luego dispersar superficialmente un polvo o solución con alto contenido de partículas finas de hierro. Es aplicable a materiales ferromagnéticos y, al igual que lo que ocurre con tintas penetrantes, pueden detectarse sólo discontinuidades superficiales.*

4.5.9 Radiografía Industrial

- *La radiografía industrial consiste en exponer una pieza a la acción de Rayos X ó Rayos Gamma. Siendo que el grado de absorción y dispersión a la radiación electromagnética depende del espesor y tipo de material (las discontinuidades presentan un cambio de densidad en la materia), pueden detectarse imperfecciones internas de una pieza mediante una placa fotosensible ubicada detrás de ella.*

4.5.10 Extensometría (Strain Gauges)

- *Técnica basada en el principio físico que establece que cualquier cambio en las dimensiones de un elemento conductor produce una variación proporcional en su resistencia eléctrica. Los desplazamientos o deformaciones generadas por los esfuerzos, pueden identificarse con transductores pasivos denominados strain gauges o galgas extensométricas.*

4.5.11 Boroscopía Industrial

- *Se trata de una técnica visual remota que aumenta la capacidad de observación para lugares que, de lo contrario, serían inaccesibles. Una lente (o cámara) envía una imagen óptica (o señal de video) a un visor o monitor. Se usa en recipientes pequeños, tuberías, conductos inaccesibles, atmósferas peligrosas, tubos de calderas, espacios confinados, etc.*

4.5.12 Análisis de Motores Eléctricos

4.5.12.1 Técnicas Estáticas de Inspección.

- ***Resistencia a tierra (megado).*** *Se determina el valor de resistencia a tierra de los circuitos (resistencia de la aislación) aplicando cierto voltaje y controlando la corriente de retorno. Se puede identificar la presencia de fugas de corriente a tierra.*

- ***Índice de Polarización.*** *Para identificar los modos de falla no descubiertos a través del megado, se utiliza este ensayo que consiste en evaluar el aumento progresivo de la resistencia de la aislación del estator (por humedad / suciedad) conforme se aplica una tensión (c.d.) durante cierto tiempo estandarizado (por ejemplo diez minutos).*

- ***Resistencia entre fases.*** *Da un indicio del estado de anomalías tanto del motor como del circuito. De no haber suficiente aislación, circularán corrientes de fuga que provocan un mal funcionamiento y posterior calentamiento del equipo.*

- ***Inductancia entre fases.*** *Permite monitorear el desequilibrio entre los flujos de las corrientes de los bobinados del estator y su calidad.*

- ***Capacitancia entre fases.*** *Cuando el valor de capacitancia entre fases aumenta, puede sospecharse humedad o suciedad (polvo, aceite, etc.) en los elementos aislantes del estator.*

4.5.12.2 Técnicas Dinámicas de Inspección

- ***Voltaje de fases.*** *El monitoreo dinámico de los voltajes de fase puede indicar un síntoma de avería en los circuitos resistivos.*

- ***Corriente de fases.*** *Es posible diagnosticar rotura de barras en el rotor, cortocircuito en rotores tipo jaula, alta resistencia entre barras, excentricidad (estática o dinámica) del rotor y cortocircuitos en el estator, analizando el espectro en frecuencia de la corriente de alimentación cuando el motor opera bajo carga nominal.*

- ***Corriente de Arranque.*** *El comportamiento del valor eficaz de la corriente de arranque en un motor de inducción, permite suponer la existencia de averías en el rotor o en el estator, sabiendo que el valor pico de la intensidad en el arranque está entre 6 y 9 veces por encima del nominal.*

- ***Análisis de la calidad de la Energía Eléctrica.*** *Muchos daños ocurridos en motores eléctricos son causados por una mala calidad en la alimentación. Los modos de falla más comunes que inducen averías son: armónicas en el voltaje o en la corriente, picos de voltaje, desbalanceo de voltaje y factor de potencia, bajos y altos voltajes de alimentación, presencia de armónicas, contactores averiados, etc.*

4.5.13 Ensayo de Impedancia en Baterías

- *Los instrumentos utilizados aplican una pequeña señal de c.a. entre los bornes de cada celda que no afecta la tensión base. Luego, calculan automáticamente la impedancia, la resistencia de la conexión entre celdas y la tensión c.c. La prueba demanda pocos minutos y los reportes son de fácil comprensión. Se reconoce el nivel de deterioro porque conforme la batería envejece, su impedancia interna aumenta. Si la impedancia disminuye la falla sintomática puede obedecer a un corto interno.*

4.5.14 Análisis de Gases de Combustión

- *Esta tecnología se aplica con éxito en industrias químicas y petroquímicas, en refinerías, en la producción de energía eléctrica, en la industria farmacéutica, en el control del medio ambiente, en la optimización de procesos, etc. El elemento sensor está constituido por una sonda de muestreo sensible al gas (o conjunto de gases) y puede estar acompañada de un tubo Pitot para medir presión diferencial (velocidad) y de un sensor de temperatura. Son ejemplos comunes, los análisis de calderas y los análisis de motores de combustión.*

4.5.15 Alteración en los parámetros de Calidad del Producto

- *Las funciones de los equipos generalmente se ven parcial o totalmente afectadas cuando se producen fallas incipientes en sus componentes. El desvío de ciertas variables de proceso permite, en muchos casos, identificar la presencia de fallas sintomáticas.*

Capítulo 5

Mantenimiento Detectivo y Riesgo Industrial

Es tan corto el amor y tan largo el olvido[1].

---

1 Pablo Neruda (1904 - 1973).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Comprender el significado de los chequeos funcionales (mantenimiento detectivo) y su alcance.
- √ Entender la diferencia entre fallo oculto y evidente, evaluar consecuencias en la operación.
- √ Interpretar el significado de falla simultánea.
- √ Identificar los Sistemas de Seguridad. Clasificar las redundancias y las protecciones.
- √ Determinar bajo qué condición técnica es conveniente aplicar rutinas de inspección detectivas.
- √ Identificar y estimar el Riesgo Industrial, cuantificar los parámetros y seleccionar el método de análisis más eficaz para cada situación.
- √ Adquirir el nivel básico de conocimientos acerca de las herramientas de Gestión para el análisis de riesgo; FMEA, HAZOP, FTA (Árbol de fallos) y FTE (Árbol de eventos).
- √ Colaborar en Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo.
- √ Calcular el intervalo de tiempo entre inspecciones detectivas para distintas configuraciones.

Índice de Contenidos

5.1 Mantenimiento Detectivo
- Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección
- Definición de Mantenimiento Detectivo
- Fallos Ocultos
- Fallas Simultáneas
- Aplicación del Mantenimiento Detectivo
- Reducción de la probabilidad de Falla Simultánea por diseño
- Cómo identificar Fallos Ocultos

5.2 Manejo del Riesgo Industrial
- Riesgo y nivel de aceptación
- Riesgo Laboral
- Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo - EPR
- Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo

5.3 Frecuencia para las Rutinas Detectivas
- Disponibilidad Intrínseca
- Estimación del intervalo entre Inspecciónes
- Cuando el Fallo Simultáneo únicamente tiene impacto económico
- Optimización de la frecuencia de inspección

Resumen de aplicación

5.1 Mantenimiento Detectivo

El Mantenimiento Detectivo es determinante para el control de los fallos, sobre todo para aquellos que involucran un alto riesgo industrial. Esta estrategia de mantenimiento se aplica con la finalidad de combatir o mitigar las consecuencias de las fallas que ocurren sobre los dispositivos Redundantes o de Protección. Se conoce también como **Inspección Funcional** y debe tratarse independientemente de los otros tipos de mantenimiento pues la selección de tareas y la determinación de sus frecuencias se sustentan en conceptos diferentes. Para una gran cantidad de fallos es preciso considerar la aplicación de esta estrategia, no habiendo obtenido resultados favorables con las ya vistas. En muchos modelos de gestión industriales, y definida la frecuencia entre inspecciones, son los mismos operadores de las máquinas quienes las realizan, a través de su inclusión dentro del Plan de Rutinas de Inspección y con suficiente grado de entrenamiento (ver Mantenimiento de Rutina, Capítulo 2).

5.1.1 Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección

Desde el punto de vista operativo o funcional, existen dos clases de sistemas de seguridad; los **redundantes** y los de **protección**. Estos dispositivos se ponen en servicio para proteger a las personas, el medio ambiente, los activos de producción o el proceso productivo, de situaciones fortuitas provocadas por factores inherentes al sistema o por causas externas dadas por el contexto operativo.

Redundancia Activa Plena

Se llama Redundancia Activa Plena a la unidad funcional (sistema, equipo o componente) que, aún funcionando a pleno régimen de carga, se instala para lograr la simultaneidad de un conjunto, desarrollando idénticas funciones que las del sistema al que protege. Esta clase de redundancias trabajan todas al mismo régimen de carga. Cuando una de ellas deja de cumplir su función, el otro elemento no aumenta su intensidad de trabajo (carga), sino que con el mismo nivel de marcha satisface la funcionalidad del conjunto. El número mínimo de componentes cuya actuación sea simultánea, es dos; pero pueden extenderse a muchos más. El diseño de un sistema puede requerir más de una redundancia activa por diferentes razones, la principal es la necesidad de mayor disponibilidad.

Cuando una función debe ser muy confiable, a veces no es suficiente con un único equipo; es imprescindible que equipos idénticos realicen funciones idénticas y en forma simultánea, para reducir la tasa de fallas del conjunto. Si falla cualquiera de los elementos redundantes, el otro (u otros) estaría en condiciones de entregar el 100% de la prestación, o al menos un porcentaje lo suficientemente alto como para garantizar las operaciones básicas.

Ejemplo 5.1.1

Los motores de combustión interna de uso aeronáutico cuentan con doble sistema de encendido. Cada cilindro tiene dos bujías energizadas por dos sistemas completamente en paralelo e independientes. Ante la falla imprevista de uno de los circuitos, el otro es capaz de entregar la chispa de encendido y garantizar, al menos, las maniobras mínimas de seguridad.

Un caso similar se ilustra en la figura 5.1.1. Se trata de una configuración compuesta por dos relés con carga actuando en paralelo para accionar un mismo circuito. Ante la avería de uno de ellos, el otro tiene la capacidad de gobernar el circuito sin dificultad. Observe que los porcentajes entre paréntesis identifican el estado de carga en situación de falla, mientras que los porcentajes sin paréntesis se refieren al nivel de carga en funcionamiento normal.

Aún en la situación en que el relé N° 2 presentase una avería (0%), el sistema queda con la funcionalidad requerida (100%).

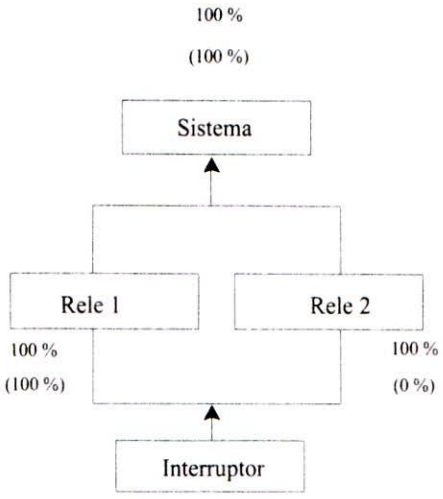


Figura 5.1.1
Redundancia activa plena de dos componentes.

En los casos donde hay más de dos componentes redundantes, la probabilidad de que se presente una falla de todo el conjunto es más baja, disminuyendo a su vez con el aumento del número de redundancias. Por tanto, si la tasa de fallas de estos relés fuese muy alta, al punto de no garantizar el nivel de confiabilidad solicitado, una alternativa sería instalar un tercer relé que también trabajaría cargado a la par de los otros dos.

En muchas ocasiones, durante la elaboración de un Plan de Mantenimiento, se pone de manifiesto la situación expresada más arriba. La frecuencia de inspección para un único elemento redundante se vuelve casi impracticable (todos los días, por ejemplo), obligando a instalar un número mayor de redundancias para disminuir la tasa de falla del conjunto y poder reducir la frecuencia de inspección de cada uno.

Redundancia Activa No plena

Las redundancias activas no plenas se dividen en dos grupos:

Homogénea: En este caso, todos los elementos trabajan al mismo régimen. Al fallar uno de ellos, el resto debe incrementar su nivel de carga para satisfacer la función del conjunto y cumplir con la capacidad estipulada.

Ejemplo 5.1.2

Un sistema con múltiples correas de transmisión. Si alguna de las correas falla, el resto debe asumir la transmisión total de potencia y se verán sobrecargadas. Vale decir que, en estado normal de funcionamiento, todas trabajan a un nivel menor de carga mientras que aumentarán sus exigencias ante la falla de una de sus compañeras.

Heterogénea: Cuando uno de los elementos trabaja a mayor velocidad que el resto y, al fallar, los demás deben garantizar la demanda de carga o volumen del grupo completo.

Ejemplo 5.1.3

Supongamos que por cuestiones de proceso tres bombas trabajan simultáneamente y una de ellas impulsa 100 m^3/h de agua a un depósito elevado mientras las otras dos se encuentran restringidas a sólo 50 m^3/h. Si se produce una falla en la de 100 m^3/h las dos bombas restantes deberán trabajar a 100 m^3/h cada una, pero si se produce una falla en una de las de 50 m^3/h la otra de 50 m^3/h también debe elevar su nivel de bombeo a 100 m^3/h.

Por de pronto, se podría proponer que funcione una de las bombas de 50 m^3/h a 100 m^3/h, dejando una de ellas en reposo o stand-by. Esto es cierto, dado que generalmente es más conveniente dejar más elementos redundantes y menos funcionando. Sin embargo, en algunos procesos productivos no siempre es posible, por lo que se recurre a este tipo de distribución.

Es importante observar que en muchas ocasiones se hace necesario efectuar controles funcionales (cuando la velocidad nominal es bastante menor que su capacidad), porque pueden presentarse modos de falla que no afectan el equipo en cierto régimen de marcha pero sí lo harían para el de su máxima capacidad. Para estos casos, es posible aplicar una detección de fallos.

Redundancia Pasiva

Todos aquellos equipos que se encuentran en reposo pero prestos para funcionar si ocurre una avería operacional del elemento a resguardar, se denominan redundancias pasivas. Los sistemas de detección y arranque del dispositivo redundante son, generalmente, automáticos. Se los conoce también como equipos en stand-by. Por ejemplo, una bomba que debe entrar en funcionamiento si su compañera se detiene, o un banco de baterías para soportar una caída de tensión temporal de la red principal de alimentación eléctrica.

El elemento protegido es el que funciona normalmente y el stand-by permanece en espera para comenzar su actividad y suplir a la función que ha fallado con las mismas prestaciones, al menos, por un tiempo prudencial.

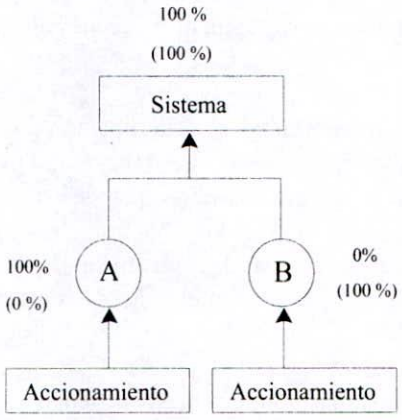


Figura 5.1.2
Redundancia pasiva de dos componentes.

Ejemplo 5.1.4

El ejemplo más característico es el de dos bombas idénticas (A y B), en la que una (B) juega el rol de elemento redundante (figura 5.1.2). En rigor, las funciones son bien diferentes. La bomba A tiene la misión principal de marchar al régimen nominal durante la operación, mientras que la B se mantiene en espera y en condiciones básicas de funcionamiento. Ante una avería en la primera, la segunda debe entrar en servicio satisfaciendo las necesidades funcionales de la operación.

Otro ejemplo mucho más fácil de comprender, lo representa el neumático de auxilio en los automóviles o medios de transporte. Las ruedas en funcionamiento son generalmente idénticas a la de reserva, sólo que sus funciones son distintas. Esta última debe mantenerse en reserva y disponible ante la falla de cualquiera de las instaladas y en rodaje.

Dispositivos de Protección

Desde la óptica del mantenimiento, los dispositivos de protección agrupan a los sistemas cuya función es **comunicar, evitar** o **neutralizar** situaciones de riesgo. Los dispositivos de protección pueden pertenecer, entonces, a tres categorías:

1) **Protección Interruptiva**: Se dice que una protección es **interruptiva**, cuando su función es *desafectar, desconectar* o *detener* totalmente al sistema protegido, ante una avería o situación peligrosa de éste último.

Ejemplo 5.1.5

El disyuntor diferencial en una instalación eléctrica tiene como función primaria cortar el flujo de energía eléctrica cuando existe un pasaje a tierra por encima de cierto valor superior, por

ejemplo, a 30 mA. Cuando por alguna razón, hay un pasaje excesivo de energía a masa (función protegida), el disyuntor actúa inmediatamente abriendo el circuito e interrumpiendo el flujo de electricidad a todo el sistema.
Puede comprobarse fácilmente que los disyuntores están provistos de una "tecla de chequeo" que los fabricantes sugieren sea accionada con cierta frecuencia (una vez cada 6 meses, por ejemplo); esta rutina constituye una tarea de detección de fallos.

Ejemplo 5.1.6
Los sistemas denominados "vigías" en los motores de combustión interna de los autoelevadores, también son protecciones interruptivas. Dichas protecciones controlan los parámetros de temperatura y presión de aceite, y si alguno de ellos sobrepasa cierto valor límite, detienen el motor no permitiendo el arranque hasta que haya sido reestablecida la situación a su estado de condición básica normal.

2) **Protección Contensiva**: Los dispositivos de protección que cumplen una función **contensiva** son aquellos que *reducen* o *eliminan* las consecuencias de los fallos del equipo o función protegida.

Ejemplo 5.1.7
Los sistemas de Air-bag en los automóviles modernos, son protecciones del tipo contensivas. Dichos elementos no evitan que ocurra el siniestro (accidente) pero actúan como *amortiguadores* o *contenedores* de los efectos y sus consecuencias que, de otra manera, podrían tener mucha más gravedad.
Los protectores mecánicos en las correas de transmisión de los motores eléctricos, también constituyen protecciones contensivas; no evitan el daño de las correas, pero sí contienen sus consecuencias.

3) **Protección Indicativa**: Las protecciones indicativas tienen la finalidad de *poner en conocimiento* a las personas que se produjo o se está por producir una situación anormal. Las alarmas son protecciones indicativas; cuando los parámetros establecidos para activarlas llegan al valor prefijado, éstas se encargan de "avisar" en forma visual o sonora sobre la ocurrencia de la anomalía.

Ejemplo 5.1.8
Cierto sistema de lavado posee una alarma por máxima temperatura. Si por razones ajenas a la protección indicativa se produce un incremento de temperatura por encima del valor establecido, una alarma visual se enciende en el tablero de control de proceso.
La luz indicadora de baja presión de aceite en el tablero de un automóvil, es una protección indicativa. Protege al motor de los daños que le sucederían de funcionar con baja presión de aceite.

En la figura siguiente se resumen los dispositivos de seguridad según esta categorización.

Figura 5.1.3 Diferentes tipos de sistemas de seguridad.

5.1.2 Definición de Mantenimiento Detectivo

Se considera Mantenimiento Detectivo al conjunto de rutinas / tareas cuya finalidad es poner de manifiesto fallos ocultos[1] que ocurren en dispositivos redundantes o de protección, por medio de chequeos regulares de su funcionamiento o de alguna variable.

La metodología RCM lo introduce marcando puntualmente la diferencia con los otros tipos de mantenimiento y dándole un rol protagónico en el diseño del Plan de Mantenimiento, sobre todo por el impacto que pueden tener los fallos ocultos en la seguridad de personas y entorno. Ya hemos visto que en mantenimiento preventivo y predictivo, el intervalo de tiempo entre dos intervenciones tiene poco que ver con el tiempo promedio entre dos fallos. Sin embargo, en una estrategia detectiva el intervalo entre dos chequeos es directamente proporcional al MTBF ó tasa de fallas (λ) del dispositivo de seguridad (Redundancia o Protección). También se mencionó en capítulos anteriores que la tasa de fallas es la probabilidad de que a un elemento le ocurra una falla en cualquier instante dado $(t + \Delta t)$, estando en estado satisfactorio en (t). Cuanto mayor sea la tasa de fallas, para un comportamiento del tipo exponencial, menor tendrá que ser el tiempo transcurrido entre dos rutinas detectivas, pues el objetivo es aumentar la probabilidad de buen funcionamiento. Esto obliga a verificar que el elemento se encuentre operativo (disponible) el mayor tiempo posible.

5.1.3 Fallos Ocultos

En el Capítulo 1 se mencionaron los distintos tipos de modos de falla. Se comentó brevemente la importancia de identificar y determinar los fallos ocultos. En muchas organizaciones aún no se los consideran ni se los trata en forma particular; sin embargo, y dependiendo del tipo de industria, se cree que entre el 20 y 40% de los fallos de una instalación, son ocultos.

Los modos de falla son las causas que producen las averías operacionales y, en general, ponen a las instalaciones en una situación de indisponibilidad. Algunos fallos son **evidentes** y, tarde o temprano, su consecuencia será la detención o mal funcionamiento del activo (función evidente). Antes de analizar los fallos ocultos entonces, veamos dos ejemplos de fallo evidente.

Ejemplo 5.1.9

Supongamos una válvula de proceso que en operación normal se requiere de su apertura una vez al día. Si la misma sufre una falla en cualquier momento, tal que no permite el pasaje de producto, el fallo será evidente en la siguiente operación (necesidad de funcionamiento); es decir, al otro día. Aunque haya transcurrido un día en detectarse, el fallo resultará evidente.

Ejemplo 5.1.10

Una bomba tiene como principal función elevar agua desde una cisterna a un depósito elevado. Cuando se presente un fallo sobre ella, será evidente para los usuarios debido a que el tanque superior en *algún momento* se quedará sin agua, independientemente de su volumen.

Nótese que en los dos ejemplos, el fallo será **evidente** a los usuarios, independientemente del tiempo transcurrido para que se manifieste la consecuencia, y considerando siempre que no se realizan intervenciones de mantenimiento. Sin embargo, existe gran cantidad de fallos en los sistemas redundantes o de protección, en los que su mera ocurrencia, y suponiendo que es siempre el **único** que se produce, no deriva en la avería funcional. Es decir que, aunque se produzca, no tiene como consecuencia directa dejar fuera de servicio a la instalación (para la hipótesis de ocurrencia única). A este tipo de fallos, en gestión de mantenimiento, se los llama **ocultos**.

*Un modo de falla se considera **oculto** si, suponiendo que es el único que se produce, no se hace evidente a los usuarios durante la operación normal del sistema, considerando que no se realizan tareas de mantenimiento, y sin importar el tiempo trascurrido.*

Esto ocurre casi exclusivamente en dispositivos **redundantes** y **de protección**, que tienen como misión garantizar el cumplimiento de **funciones ocultas**[2].

---

1 Los mismos se analizan en la sección siguiente.

2 "Una función oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operarios bajo circunstancias normales, si se produce por sí sola"; RCMII Reliability Centred Maintenance de John Moubray - Aladon LLC[2004], página 97.

Veamos, entonces, dos ejemplos sencillos de fallo oculto.

Ejemplo 5.1.11
La falta de presión de aire en el neumático de auxilio de un automóvil es claramente una falla oculta, desde el punto de vista de la gestión de mantenimiento. El conductor se daría cuenta del estado de falla del auxilio, sólo si fallaran cualquiera de las ruedas en rodaje y necesitara, por consiguiente, de la redundancia (auxilio).

Se supone que no se realizan chequeos funcionales de inspección en el auxilio.

Ejemplo 5.1.12
La función de los detectores de humo es accionar los mecanismos de protección (alarmas, extintores, etc.) en sitios cerrados, ante un siniestro. Si se produjera un fallo en los detectores tal que ante la presencia de humo éstos no actuasen debidamente, sólo sería evidente su falla si se produce un incendio (es decir, cuando falla la función a resguardar). Si nunca se produce un siniestro y si, además, no se realizan tareas de inspección sobre los detectores, el fallo sobre éstos pasaría inadvertido indefinidamente.

Nótese en ambos ejemplos que el fallo nunca sería evidente para nadie si se supone que es el único que se produce y si se asume que no se hacen rutinas de detección.

Los fallos ocultos pueden ser estáticos o dinámicos.

Fallo Oculto Estático
Un fallo oculto es estático cuando ocurre sobre algún componente redundante o dispositivo de protección no cargado. Los dispositivos de seguridad tienen como misión actuar de protección ante la avería de algún otro sistema. Si el fallo es oculto, y se produce sobre un equipo de estas características, se dice que es **estático**.

También se pueden presentar fallos ocultos estáticos en las redundancias pasivas (equipos en stand-by). Al igual que en los dispositivos de seguridad, sólo sería evidente que ha ocurrido un fallo oculto, cuando sea necesaria su intervención.

Ejemplo 5.1.13
Un disyuntor instalado en un circuito eléctrico es una **protección interruptiva**. La manifestación de cualquier modo de falla en el mismo, no se podrá advertir naturalmente en la medida que no sea necesaria su actuación. Suponiendo que no se realiza ninguna tarea de mantenimiento sobre éste, y que nunca es necesario su funcionamiento, el disyuntor podría estar en estado de falla eternamente. El fallo es oculto y, además, estático.

Fallo Oculto Dinámico
Los fallos ocultos dinámicos se presentan sobre los dispositivos redundantes cargados. Se dijo que los mismos son equipos o sistemas que se encuentran en funcionamiento y que su función consiste en aumentar la simultaneidad de otro sistema. En instalaciones con alta demanda de disponibilidad es necesario duplicar funciones para elevar a niveles aceptables la probabilidad de buen funcionamiento. En estos casos, el fallo oculto es dinámico porque, aunque se haya manifestado, no será identificable por el usuario dado que el conjunto esta diseñado para satisfacer totalmente las funciones aún con uno de sus componentes en estado de avería.

Tanto en uno como en otro caso, es preciso detectarlos, pues aún estando la función en una situación estática o dinámica, no se advertirán naturalmente durante el funcionamiento normal.

5.1.4 Fallas Simultáneas
La falta de disponibilidad de un equipo redundante o de protección, tiene su verdadero impacto cuando se combina con la avería (falla funcional) del equipo que se intenta resguardar. Cuando esta combinación se presenta, se dice que ha ocurrido una **Falla Simultánea**.

Sabemos del punto 5.1.3 que una función oculta (de un dispositivo) es aquella que, estando indisponible, no se hace evidente en condiciones normales de uso. Las consecuencias que pueden derivarse de

un fallo oculto afectarán al sistema en general de forma múltiple. El fallo de una función oculta sólo tiene consecuencias cuando la función a resguardar deja también de funcionar. Cuando las **dos** fallas se producen (oculta del sistema de seguridad y funcional de la función protegida) ocurre una falla simultánea.

En definitiva, lo que se persigue con la detección de fallos ocultos (Mantenimiento Detectivo) es evitar las fallas simultáneas. El esfuerzo que se haga para evitar un fallo oculto dependerá de la gravedad de la falla simultánea (parámetro a considerar cuando se establecen los intervalos de chequeo para estas rutinas).

*Se define como **Falla Simultánea** a la situación que se presenta cuando, estando en estado de falla el equipo de protección (falla oculta), se produce una falla funcional en el sistema o función a proteger.*

La complejidad técnica, el nivel de demanda de las funciones protegidas y las consecuencias que una organización está dispuesta a tolerar para una falla simultánea, dependen de varios factores. El volumen de mantenimiento detectivo está en función de la gravedad que implique la falla simultánea.

Dado que los equipos industriales tienen la característica de ser cada día más complejos, y que las reglamentaciones vigentes en materia de seguridad son cada vez más rigurosas, se impone la necesidad de instalar nuevos dispositivos que es necesario chequear a través de acciones de carácter detectivo dada la elevada carga de modos de falla **ocultos** que, por lo general, tienen.

Es oportuno reiterar que si bien el Mantenimiento Detectivo se aplica únicamente para poner de manifiesto fallos ocultos, no significa que la única o mejor herramienta para identificarlos sea ésta. Debe aplicarse únicamente en aquellas situaciones que no fue posible encontrar rutinas preventivas, predictivas o de algún otro tipo (pro-activas). No obstante, para algunos sistemas es la única manera de asegurar un nivel conveniente de condición básica. Además, hay situaciones en las que puede aplicarse en forma combinada con otras estrategias; por ejemplo, para arreglos que demandan alta confiabilidad.

Se discute todavía, si el mantenimiento detectivo constituye una acción del tipo **pro-activa**, dado que en realidad intenta poner de manifiesto fallos que ya se produjeron. Aunque estas tareas persigan descubrir si un sistema esta aún disponible o no, se considera aquí una acción pro-activa porque su objetivo es evitar la falla funcional simultánea que, claramente, es una acción pro-activa.

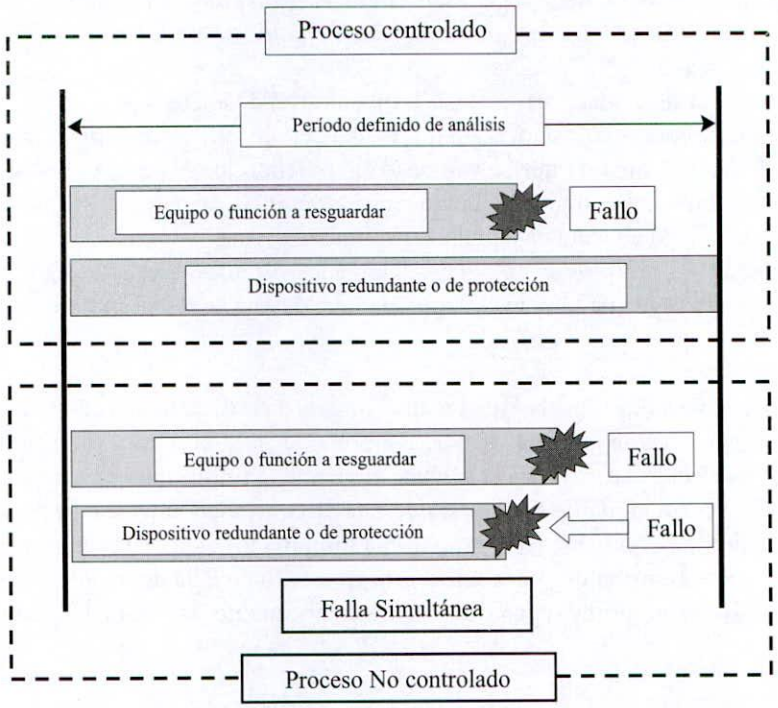


Figura 5.1.4 Combinación necesaria para la falla funcional simultánea.

5.1.5 Aplicación del Mantenimiento Detectivo

Vale la pena destacar las condiciones que deben cumplirse para que la decisión de aplicar chequeos funcionales, se justifique. Únicamente debe considerarse la aplicación de este tipo de rutinas, bajo dos aspectos fundamentales.

El primero tiene que ver con que realmente el fallo sea oculto; es decir que, bajo ninguna circunstancia, será evidente a los usuarios durante el tiempo normal de operación. El segundo, también muy importante, es asegurar que no ha sido posible encontrar alguna otra tarea pro-activa (preventiva, predictiva, etc.) para el modo de falla considerado. Esto se basa en el hecho de que generalmente para este tipo de sistemas de seguridad siempre es más afortunado prevenir los fallos (si la función de distribución de fallas obedece exactamente a la ley normal) que detectarlos una vez ocurridos, siendo que existirá (aunque muy baja) una probabilidad para la falla funcional simultánea. Ver figura 5.1.4

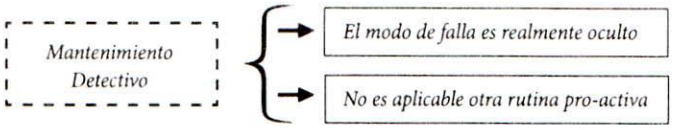


Figura 5.1.5 Condiciones necesarias para la aplicación de mantenimiento detectivo.

5.1.6 Reducción de la probabilidad de Falla Simultánea por diseño

Muchos diseños tecnológicos industriales presentan la característica de intentar transformar en evidentes los fallos ocultos (al menos por algún tiempo y hasta un determinado nivel). Algunas funciones de seguridad tienen la característica de "avisar" cuando se encuentran en un estado de indisponibilidad.

Supongamos por caso que la rueda de auxilio de un vehículo tuviese la posibilidad de indicar, por medio de una luz en el tablero, que la presión de aire está por debajo de la necesaria para rodar. En estos casos se dice que la redundancia pasiva (rueda auxilio) tiene **Seguridad Intrínseca**[1].

Ejemplo 5.1.14

Tómese el mismo ejemplo de las protecciones contensivas (5.1.7 sistema Air-bag). Algunos vehículos se entregan provistos de una prestación que indica, por medio de una alarma visual, que el dispositivo de protección no está disponible en alguna de sus localizaciones. En tal caso, el **dispositivo de protección contensivo primario** (Air-bag), tiene **seguridad intrínseca**; sin embargo, probablemente el **sistema de protección indicativo secundario** (circuito indicador de no disponibilidad de la función Air-bag) no posea seguridad intrínseca.

Lamentablemente la seguridad intrínseca se limita al nivel de análisis de los componentes. La **Falla Simultánea** siempre tendrá una instancia de no "evidencia" en función del nivel de análisis realizado para los modos de falla. A medida que se van descomponiendo los equipos en subsistemas y los subsistemas en componentes, habrá un nivel que no tenga inherencia de seguridad y que podrá ser necesario realizarle alguna tarea de búsqueda de fallos[2] ocultos.

De todas formas, estos arreglos tecnológicos dotan a los sistemas de mayor seguridad que si alguna de sus partes no tuviera seguridad intrínseca, pues la falta de ésta se restringe a una pequeña parte.

Ejemplo 5.1.15.

Consideremos una válvula de seguridad (dispositivo de protección) montada en un recipiente sometido a presión como puede ser una caldera (dispositivo protegido). Si la presión dentro del recipiente sobrepasa el límite establecido, se activaría la válvula, aliviando la presión interior. Si la válvula de seguridad falla en posición cerrada, nadie se enterará de esta circunstancia mientras la presión de la caldera no supere el valor límite. Asumiendo que no se toma ninguna medida de mantenimiento sobre la válvula, únicamente nos enteraríamos que se encuentra en estado de falla de requerirse su apertura.

Se dice que la válvula no posee seguridad intrínseca porque no "avisa" de la existencia de un "fallo oculto estático".

---

1 El RCM lo identifica como Seguridad Inherente. Se considera más conveniente la utilizada aquí por razones de comprensión y manejo durante el diseño del Plan de Mantenimiento.

2 La norma SAE JA 1012 establece (página 6) que una tarea de búsqueda de fallos es "una tarea programada que se utiliza para determinar si ha ocurrido un fallo oculto"; es decir, Mantenimiento Detectivo.

Generalmente para combatir estos fallos ocultos se aplican rutinas preventivas, dado que la tasa de falla entre intervenciones es muy baja al igual que en el período de "mortalidad infantil" a partir de su instalación.

5.1.7 Cómo identificar Fallos Ocultos

Al momento de calificar a un fallo como oculto debe tenerse mucho cuidado en no caer en algunas trampas, principalmente en lo referido al factor tiempo. *"Existe muchas veces la tentación de decir que un fallo es oculto si pasa un periodo de tiempo considerable desde el momento en que ocurre al momento en que se pone en evidencia. De hecho, esto no es así. Si la pérdida de función tarde o temprano se vuelve aparente para los operadores por sí misma como resultado directo e inevitable del fallo, éste es evidente, sin importar el tiempo que pase entre el fallo en cuestión y el momento en que se lo descubre"*[1].

Quedan pocas dudas luego de la definición anterior; sin embargo, es necesario considerar dos cuestiones más para calificar a un fallo como oculto.

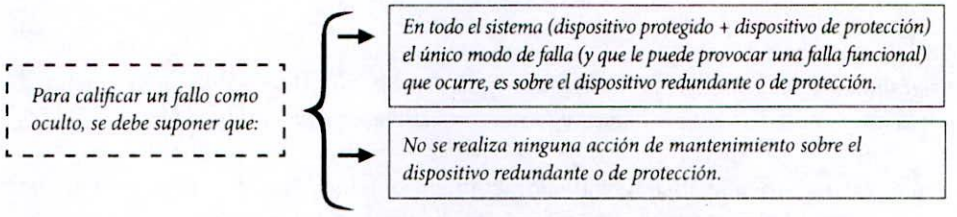


Figura 5.1.6. Consideraciones a tener en cuenta para calificar a un fallo como oculto.

Es frecuente la aparición de fallos ocultos en equipos médicos de emergencia, interruptores térmicos, sistemas electrónicos de control, alarmas, sistemas contra incendios, elementos de protección, mecanismos stand-by y, básicamente, todos los equipos redundantes de proceso.

NOTA: Mediciones de puesta a tierra. Una salvaguarda o protección contensiva de valiosa utilidad en muchos sistemas eléctricos, son los circuitos de *puesta a tierra*. Las estructuras o chasis metálicos, que ante un corto pudieran quedar energizados, deben estar provistos de un circuito auxiliar de seguridad capaz de conducir la corriente circulante evitando que fluya por la estructura. Por ejemplo, en estructuras edilicias, un sistema de puesta a tierra protege a las personas y a las instalaciones de la caída de rayos, descargas estáticas, etc.

Varias normas internacionales destacan que deben ponerse a tierra, edificios, partes metálicas, máquinas, artefactos, etc. a través de mallas conductoras o jabalinas debidamente enterradas. Para asegurar que dichos sistemas de seguridad se encuentren operativos, puede ser necesario llevar a cabo búsquedas de fallos ocultos (mantenimiento detectivo).

---

1 RCMII Reliability Centred Maintenance de John Moubray - Aladon LLC2004, página 128.

5.2 Manejo del Riesgo Industrial

Es de público conocimiento que cada día se hace mayor la necesidad de identificar y controlar potenciales eventos (sucesos) que, aún con **baja probabilidad de ocurrencia**, tienen **consecuencias muy graves**. Esto cobra mayor importancia todavía en las organizaciones cuyos procesos son de alto riesgo.

Las evaluaciones probabilísticas de riesgo buscan cuantificar las consecuencias de los fallos con gran impacto en la seguridad personal, en el medio ambiente o en los intereses económicos de la compañía.

Analizar las secuencias de los fallos es un trabajo laborioso. Además, estos modos de falla generalmente son de baja ocurrencia, y obligan a hacer estimaciones que envuelven cierta incertidumbre. Muchas veces, es preciso valerse de datos estadísticos de componentes similares que actúan en contextos operativos diferentes, lo cual provoca que se pierdan las posibles interferencias (acoplamientos) sistémicas cuyas consecuencias pueden ser aún peores que la de los propios modos de falla actuando por separado.

Las organizaciones modernas, y la sociedad toda, está tomando cada vez más conciencia del **Riesgo** y hay cada vez más interés en controlarlo. Controlar el riesgo no significa eliminarlo por completo. No siempre se obtendrá una ventaja competitiva eliminando todos los riesgos; perseguir la eliminación total puede ocasionar una pérdida de beneficios.

5.2.1 Riesgo y nivel de aceptación

El riesgo es la probabilidad de que un suceso no deseado (potencial pérdida) provoque un accidente durante la realización de una actividad determinada, y cuyas consecuencias son cuantificables.

Se trata de un parámetro probabilístico, cuya valoración es subjetiva. No se lo puede medir pero sí calcular en muchos casos. El **riesgo** que una persona está dispuesta a **tolerar** (potencial peligro), es función del grado de **control personal** que se tenga sobre el proceso. A medida que el control sobre el proceso riesgoso disminuye, también disminuye la tolerancia que se tiene. El riesgo individual es diferente al riesgo social.

Las personas, por lo general, tienen menos tolerancia al riesgo social que al individual. Por ejemplo, y aunque la tasa de accidentes indique lo contrario, un conductor está dispuesto a tolerar mayor riesgo si es él quien conduce (se suele no ser tan exigente con uno mismo); lo contrario sucede si viaja en un transporte público de pasajeros (se suele ser muy exigente con la empresa y el conductor). La tolerancia al riesgo es menor por ser mayor la exigencia. De cualquier manera, cuando un riesgo no es controlado, pueden ocurrir serios daños.

El tipo de riesgo que se da en el ámbito industrial se denomina riesgo **desfavorable** dado que siempre se está en una situación potencial de pérdida. La empresa se encuentra de cara a perder o no perder, pero nunca de obtener un beneficio adicional (ganar). El riesgo favorable sólo se presenta en los juegos de azar.

En términos generales, y como primera aproximación, el riesgo se caracteriza por dos aspectos fundamentales: **Probabilidad de Ocurrencia** (P) y **Magnitud de sus Consecuencias** o daño (C). Es la esperanza matemática de la pérdida (consecuencia).

$$R = P \,.\, C = (1/MTBF_{\text{modo de falla}}) \,.\, C \qquad (5.2.1)$$

Si, por ejemplo, un accidente (originado por un modo de falla) tiene una probabilidad de ocurrencia de una vez cada 10 años, y la magnitud de la consecuencia es perder u$s 300.000 por cada evento, entonces el riesgo será:

$$R = (1/10 \text{ años}) \times 300.000 \text{ u\$s} = \text{u\$s } 30.000/\text{año}$$

La figura 5.2.1 muestra una familia de curvas (1, 2, 3 y 4) cuyo riesgo, a través de cada una, es equivalente; se denominan curvas de iso-riesgo[1]. El riesgo aumenta o disminuye conforme se pasa de una curva a otra, como lo indican las rectas que intersectan a las curvas.

---

1 Master en Gestión Técnica y Económica en el Sector Eléctrico. Javier García González Quijano, página 137.

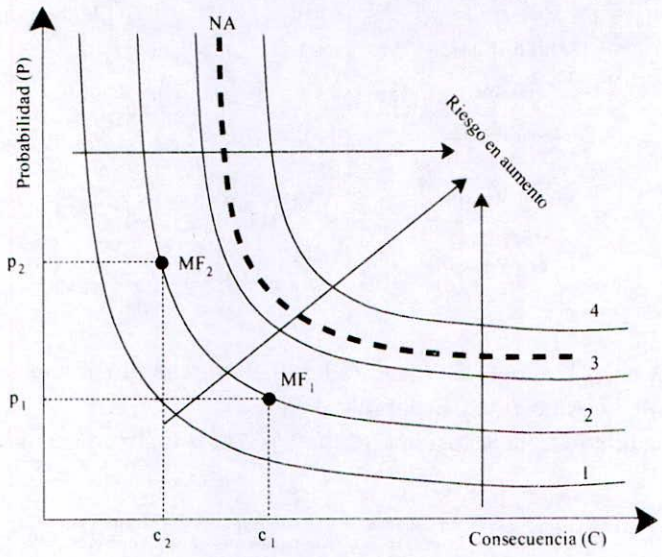


Figura 5.2.1
Curvas de riesgo equivalente.

La curva punteada NA representa el nivel tolerado de riesgo por la organización.

Si se mantiene constante la **Probabilidad** (P) y se disminuye la **Consecuencia** (C), se bajará el nivel de riesgo. Lo mismo ocurre si se mantiene constante la **Consecuencia** (C) y se disminuye la **Probabilidad** (P). Por supuesto, será también válida una combinación de ambas. Estos dos tipos de acciones para bajar el nivel de riesgo de un sistema, se las conoce como **"pro"**. La primera, llamada **Proactiva**, persigue disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento; la segunda, llamada **Protectiva**, busca minimizar la magnitud de sus consecuencias.

El **Mantenimiento Detectivo** es una herramienta beneficiosa para actuar sobre la primera.

Los modos de falla son puntos que se ubican sobre las curvas de iso-riesgo. Obsérvese que dos modos de falla diferentes, MF_1 y MF_2 (figura 5.2.1), pueden causar también diferentes consecuencias pero localizarse en una misma curva. Cada uno tendrá como ordenada un valor de probabilidad de ocurrencia y como abscisa uno de consecuencia.

Si al analizar los modos de falla de una instalación, la combinación de su probabilidad de ocurrencia y de sus consecuencias es tal que se ubica más allá de NA, entonces se deberán tomar acciones proactivas y/o protectivas de inmediato para lograr que el nivel de riesgo disminuya y se ubique por debajo de la línea establecida como límite de tolerancia (NA).

Suele resultar incómodo cuantificar con la misma unidad de medida todos los niveles de gravedad que un modo de falla tiene sobre una instalación. Esto se debe a que un mismo fallo puede afectar la *Seguridad*, el *Medio Ambiente* o sólo tener cierto *impacto económico*. Por lo tanto, tal vez resulte conveniente trazar más de una curva de riesgo, de acuerdo a los aspectos mencionados. Se obtendría así una curva para aquellas consecuencias sobre la integridad física de las personas y otra, por ejemplo, para las consecuencias que sólo puedan tener algún impacto económico.

No debemos dejar de mencionar que también son útiles las llamadas "Matrices de Riesgo". El método plantea tabular la Probabilidad y la Consecuencia según se ilustra en la figura 5.2.2[1].

---

1 Ver "Matriz de Riesgos" en Master en Gestión Técnica y Económica en el Sector Eléctrico. Javier García González Quijano, página 145.

Probabilidad (P)	A	B	C	D	E
Muy Probable	I	I	HI	HI	HI
Probable	MI	I	I	HI	HI
Medianamente Probable	MI	MI	I	I	HI
Poco Probable	LI	MI	MI	I	I
Muy poco probable	LI	LI	MI	I	I

Consecuencia (C)

Figura 5.2.2 Matriz de Riesgo genérica.

Los valores desde A hasta E adoptarán magnitudes diferentes en función de los tres aspectos mencionados (Seguridad, Medio Ambiente y Económico).

Por ejemplo, la tabla referida a la Seguridad resultará según la matriz de la figura 5.2.3.

Probabilidad (P)	Sin efectos ni lesionados	Lesionados leves / Daños menores de salud	Lesionados importantes / Daños de salud permanentes	Discapacidad permanente / Daños de salud permanentes	Una o más víctimas mortales
Muy Probable	I	I	HI	HI	HI
Probable	MI	I	I	HI	HI
Medianamente Probable	MI	MI	I	I	HI
Poco Probable	LI	MI	MI	I	I
Muy poco probable	LI	LI	MI	I	I

Consecuencia (C)

Figura 5.2.3 Matriz de Riesgo para la Seguridad.

En general, y para cualquiera de los tres aspectos (seguridad personal, medio ambiente y económico), la organización puede decidir que sólo tolera eventos cuyo valor de riesgo no se ubique más allá de "I" (criterio de aceptación). Al igual que para las curvas de iso-riesgo, todas aquellas combinaciones **probabilidad - consecuencia** que caigan en HI, no serán aceptadas y deberán tomarse acciones correctoras de inmediato. Las pertenecientes a los grupos "I", "MI" y "LI" corresponden, respectivamente, a fallos cuyas consecuencias son no deseadas pero aceptadas en mayor o menor grado. Aún así, esos fallos deben ser eficazmente controlados y gestionados. Las siglas LI, MI, I y HI no responden a ninguna acepción en particular.

5.2.2 Riesgo Laboral

En lo que respecta exclusivamente a riesgos laborales, la Unión Europea (UE) da la siguiente definición para la Evaluación de Riesgos Laborales.

"La Evaluación de Riesgos es el proceso de valoración de los daños que podrían ocasionarse como consecuencia del riesgo que entraña, para la salud y seguridad de los trabajadores, la posibilidad de que se verifique un determinado peligro en el lugar de trabajo".

Un método cuantitativo para analizar los riesgos laborales es el de William T. Fine que evalúa el **Grado de Peligrosidad (GP)** definido como el producto de tres factores: **Exposición (E), Probabilidad (P)** y **Consecuencia (C)**.

$$GP = E \,.\, P \,.\, C \qquad (5.2.2)$$

- La **Exposición** tiene en cuenta la frecuencia con la que el personal se expone al riesgo que se evalúa. Los valores definidos para este parámetro, abarcan desde situaciones que suceden muy raramente, hasta aquellas que ocurren casi constantemente.
- La ***Probabilidad*** es la posibilidad de que un riesgo termine siendo un accidente. Su valoración abarca hechos que no han sucedido nunca y que, además, es remotamente posible que ocurran, hasta aquellos que tienen una alta posibilidad de ocurrencia.
- La **Consecuencia** refleja y cuantifica, de forma estimada, el resultado final de un accidente. Sus valores cubren eventos cuyas pérdidas son casi intrascendentes, hasta aquellos que provocan acontecimientos muy graves, lesiones o muertes.

Cuando el **Grado de Peligrosidad** supera el valor de 100 puntos, deben tomarse acciones de inmediato para disminuirlo. Los valores a seleccionar para cada factor se muestran en la siguiente tabla.

Factor	Descripción	Valoración
Exposición	**Contínuamente,** muchas veces al día	10
	Frecuentemente, una o más veces al día.	7
	Ocasionalmente, una vez por semana.	4
	Irregularmente, una vez por mes.	2
	Raramente, una vez al año.	1
	Remotamente, muy difícil que ocurra pero no imposible.	0,5
Probabilidad	**Muy probable** de acabar en accidente.	10
	Mayor al 50% es la probabilidad de que acabe en accidente.	5
	Menor al 10% es la probabilidad de que ocurra.	3
	Muy extraño que suceda (menos del 1%).	1
	Nunca se ha dado, pero teóricamente es factible.	0,5
Consecuencia	**Catástrofe,** varias muertes / daños superiores a u$s 1.000.000	50
	Muerte, una muerte / daños de 500.000 a 1.000.000 dólares.	30
	Lesiones muy graves / daños de 100.000 a 500.000 dólares.	20
	Lesiones con baja / daños de 10.000 a 100.000 dólares.	10
	Lesiones sin baja / daños menores a 10.000 dólares.	5

Tabla 5.2.1 Factores utilizados en el método William T. Fine.

Se trata de una herramienta sencilla pero muy valiosa para cuantificar el nivel de riesgo de los eventos potenciales, y ordenarlos por su importancia. En algunas ocasiones se recomienda considerar en todos los casos un grado de exposición "10", respondiendo a la famosa ley que establece que *"si alguien puede salir lastimado, lamentablemente saldrá"*.

Una vez establecida la prioridad para cada una de las situaciones de riesgo, la metodología contempla, además, el cálculo de otros factores adicionales que permiten estimar la Justificación de la Acción Correctiva adoptada[1].

Veamos cómo trabajar en varios niveles de Planta, evaluando la probabilidad de que ocurra el acontecimiento no deseado en cada uno de ellos.

5.2.3 Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo - EPR

El nivel aceptable de riesgo en el campo industrial se maneja mediante las evaluaciones probabilísticas de riesgo (EPR). Cuando se determina la frecuencia de inspección de una tarea detectiva, es recomendable contar con una estimación de la probabilidad de falla tolerada para cada sector, área, equipo y modo de falla.

Ejemplo 5.2.1

Determinada Planta Industrial tolera una probabilidad de 1 en 15.000 años ($MTBF_{Planta}$) para cierto evento de magnitud tal que podría involucrar a una persona en un accidente cuyas consecuencias sean muy graves. Esto último corresponde al Nivel 1 de la tabla 5.2.2.

---

1 Es posible encontrar tal desarrollo en "Métodos de Evaluación de Riesgos Laborales" de Juan Carlos Rubio Romero, Ed. Diaz de Santos[2004], página 74.

Probabilidad del Evento en Planta / Accidente	1 en 15.000 años	1 en 30.000 años	1 en 150.000 años	1 en 600.000 años	1 en 3.000.000 años
	Nivel 1 Planta	Nivel 2 Sector	Nivel 3 Area	Nivel 4 Equipo	Nivel 5 Evento (Modo de Falla)
	P	S1	A1	E1	Evento 1
					Evento 2
					Evento 3
					Evento 4
					Evento 5
				E2	
				E3	
				E4	
			A2		
			A3		
			A4		
			A5		
		S2			

Tabla 5.2.2
Niveles de análisis para el riesgo.

Asumiendo que los sectores S_1 y S_2 son similares (tienen probabilidades equivalentes), y que la suma de sus probabilidades deberá ser 1 en 15.000, la probabilidad de ocurrencia para el sector S_1 será:

$$MTBF_{S1} = ((1/15.000)/2)^{-1} = 30.000 \text{ años}$$

Donde 1/15.000 es la probabilidad tolerada para la Planta. El número 2 en el denominador, se debe a que hay dos sectores S_1 y S_2. La inversa da como resultado el MTBF del sector S_1.

$$MTBF_{A1} = ((1/30.000)/5)^{-1} = 150.000 \text{ años}$$

Donde 1/30.000 es la probabilidad tolerada para el Sector S_1 al que pertenece A_1. El número 5 en el denominador obedece a que hay cinco sectores.

Aplicando el mismo criterio de cálculo hasta el Nivel 5 se obtiene:

$MTBF_{Planta} = 15.000$ años
$MTBF_{S1} = 30.000$ años
$MTBF_{A1} = 150.000$ años
$MTBF_{E1} = 600.000$ años
$MTBF_{Eventos} = 3.000.000$ años

Cabe hacer algunos comentarios respecto al enunciado del ejemplo. Se menciona que el evento de magnitud *"podría involucrar a una persona en un accidente cuyas consecuencias sean muy graves"*. Este comentario no es menor, dado que el evento tendría consecuencias *"muy graves"* en función del **grado de exposición** de la persona.

Supongamos que la probabilidad de que un operario se encuentre en la posición de riesgo cuando ocurre el evento es del 50%. Esto nos permitiría ajustar el Nivel 1 en 7.500 años y denominarlo "Probabilidad del Accidente". Así las cosas, se obtiene:

$MTBF_{Accidente} = 7.500$ años
$MTBF_{S1} = 15.000$ años
$MTBF_{A1} = 75.000$ años
$MTBF_{E1} = 300.000$ años
$MTBF_{Eventos} = 1.500.000$ años

Como se verá más adelante, esta reducción en el $MTBF_{Eventos}$ tolerado para los Eventos del Nivel 5, redundaría en un aumento del tiempo entre intervenciones detectivas. Sin embargo, no es recomendable afectar siempre los $MTBF_{Eventos}$ con el grado de exposición, sobre todo cuando los porcentajes rondan el 50%. Siendo que la consecuencia del evento puede afectar seriamente a una o más personas, es preferible disminuir los tiempos de inspección pero contar con instalaciones y entornos de trabajo más seguros.

5.2.4 Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo

A continuación se describen brevemente algunas de las herramientas de gestión más utilizadas para identificar y cuantificar las situaciones de peligro y colaborar en la mejora de los Planes de Mantenimiento en el ámbito industrial.

5.2.4.1 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

El FMEA (Análisis de los modos de falla y sus efectos) es una técnica metódica de análisis que permite determinar los potenciales problemas de un equipo y sus componentes asociados. Su principio analítico es inductivo. Plantea los efectos que tienen los fallos sobre la instalación y las posibles acciones para eliminarlos o controlarlos. Se puede utilizar para el desarrollo de un nuevo producto o proceso, identificando los puntos débiles del sistema. Es utilizado también en actividades cuyo fin es mejorar la calidad.

Para el caso que el estudio se encuentre dirigido al análisis de un equipo, éste debe pertenecer a la categoría de ítem mantenible. La norma ISO 14224 (para industrias del petróleo y gas) define claramente lo que se considera como ítem mantenible. (Ver RCM Capítulo 7).

El proceso se inicia con la descripción del contexto operativo y con la identificación de todos los subsistemas y componentes. Se deben valorizar todas las condiciones normales de proceso. Uno de sus pasos incluye la categorización de los fallos y sus efectos, lo que permite identificar los puntos con mayor potencial de peligro. Es considerada una técnica de análisis "base cero" porque no tiene en cuenta solamente los fallos que se han manifestado alguna vez, sino que procura estudiar los que, aún no habiendo ocurrido, tienen cierta probabilidad de hacerlo. Estudia las consecuencias de los fallos y evalúa aquellas que pueden derivar en un accidente. Cada equipo analizado debe tener su propio FMEA. Se constituye un grupo de trabajo con especialistas de diferentes áreas y un líder que trabajan con la ayuda de diagramas de bloque y planillas de información. A lo largo del análisis se establecen las condiciones normales de proceso (contexto operativo + funciones), las posibles fallas, las causas raíz, los efectos y sus consecuencias. Finalmente, se proponen las acciones más efectivas para controlar dichas consecuencias. A continuación se listan los pasos básicos para un análisis por FMEA.

1. **Describir el proceso y enumerar las funciones**. Es necesario hacer una descripción cualitativa y cuantitativa del proceso bajo análisis. Se recomienda la construcción de diagramas de bloque para identificar la funcionalidad entre las partes, así como sus relaciones lógicas. Es común indicar en el diagrama la prestación deseada para los equipos, el régimen de marcha y la capacidad de diseño, las redundancias y los sistemas de protección, etc.
   Una vez que el contexto operativo se establece claramente, y es validado por todos los integrantes del grupo, se completa la planilla de información comenzando con las funciones del sistema. Las funciones deben identificarse una a una. También deben enumerarse las funcionalidades de la relación entre los componentes.
   Ver columnas 1, 2 y 3 de la planilla de trabajo en la figura 5.2.4.

2. **Identificar los "modos de falla potenciales"**. Se identifican los "modos de falla" potenciales para cada una de las funciones en la columna 4.

Nótese las comillas utilizadas para los modos de falla. Es muy importante destacar que la metodología FMEA llama así a las condiciones que no permiten satisfacer las especificaciones declaradas en las funciones y que no necesariamente son la causa raíz de falla.
Vale decir que, en FMEA, el **modo de falla** se diferencia de la **causa raíz** de falla que es capaz de originarlo.
Sólo en el **Análisis de los modos de falla y sus efectos (FMEA)** consideraremos a los modos de falla de esta forma; para el resto, se aplicarán los conceptos establecidos en el Capítulo 1.
Este aparente juego de palabras es oportuno destacarlo ahora para evitar confusiones cuando el lector estudie las diferentes metodologías empleadas, cada una de las cuales tienen sutiles diferencias, sobre todo si se las compara con el RCM.

3. **Describir los efectos** como consecuencia de la manifestación de los modos de falla. Cada modo de falla tiene un efecto (síntoma) cuya descripción debe ser correctamente declarada (columna 5). Si el sistema es demasiado complejo, es útil la aplicación de un diagrama "causa-efecto" o esquema de Ishikawa.
   La metodología establece, además, una graduación numérica (1 al 10) para cuantificar la **severidad** del efecto. Se considera 1 si el efecto es prácticamente imperceptible por el personal de operación y 10 para los casos en que el fallo tiene consecuencias sobre la seguridad o las reglamentaciones vigentes (columna 6).

4. **Establecer las causas raíz**. Se deben describir todas las causas potenciales de fallo para cada modo de falla. Las causas deben enumerarse en forma concisa. Como herramienta alternativa de análisis para este punto, se aconseja el uso de un "árbol de fallos".
   Se aplica también una ponderación numérica (1 a 10) para determinar la probabilidad de ocurrencia de la causa raíz. Cuando la probabilidad es muy escasa o remota, el valor adoptado es 1; se reserva el valor de 10 para los casos en que el fallo se producirá seguramente. Para las situaciones intermedias puede proponerse una escala ascendente de a dos unidades.
   Columnas 7 y 8 respectivamente.

5. **Identificar lo que hoy se está haciendo** para evitar la causa de los modos de falla. Es importante describir las medidas que al momento del análisis se realizan para controlar los efectos (columna 9). Es decir, qué se está haciendo para evitar la falla al momento del análisis.

6. **Determinar la probabilidad de no detección** de acuerdo al punto anterior. Las técnicas de monitoreo, prevención o detección de fallas nunca son 100% confiables. Por razones técnicas o humanas cada una de las medidas adoptadas para controlar los efectos de los fallos (tanto la causa como sus consecuencias) tienen cierta probabilidad de éxito. Esta probabilidad estimada se vuelca en la columna 10 de la planilla de trabajo.
   Cuando es altamente probable que la causa raíz / modo de falla no sean detectados, la ponderación será 10, dejando el 1 para situaciones en las que resulta muy probable que el fallo sea advertido.

7. **Calcular el RPN** (Risk Priority Number). El RPN es un número adimensional que se obtiene como el producto de la severidad (S), la probabilidad de ocurrencia (O) y la probabilidad de la detección (D).

$$RPN = S \cdot O \cdot D \qquad (5.2.3)$$

   Se calcula para todas las causas de fallo y permite dar prioridad a aquellas que tienen mayores consecuencias. Generalmente, los valores por debajo de 100 no requieren acción inmediata (luego de evaluar costo – beneficio).

8. **Recomendar acciones** con mejor relación costo beneficio para combatir las causas raíz y sus potenciales consecuencias, comenzando por aquellas de mayor número RPN (columna 12). Se recomienda, de todas maneras, tener siempre en cuenta los efectos cuyo índice de severidad sea mayor o igual a 8, aunque la valoración del RPN haya dado menor a 100 o al valor aceptado como límite.

9. **Volcar las acciones de mantenimiento en un Plan**, identificando fecha de ejecución y responsable (especialidad - nombre).

10. **Revisar** con cierta periodicidad (anual, por ejemplo) los análisis FMEA y el Plan de Mantenimiento propuesto, siendo que el contexto operativo puede sufrir cambios de relevancia.

El proceso de análisis por FMEA es obligatorio revisarlo periódicamente, aún habiendo implementado las medidas correctivas para asegurar que se hayan alcanzado los valores de RPN establecidos como límite. Es posible que las acciones sugeridas en un principio no hayan generado los RPN deseados, por lo que se recomienda una iteración permanente del proceso.

Son muy importantes los beneficios que se obtienen por la aplicación de esta técnica, tanto para las etapas de diseño de un nuevo equipo como para mejorar Planes de Mantenimiento. Permite documentar los procesos y sus funciones.

En la figura 5.2.4 se presenta una hoja ejemplo de análisis por FMEA aplicado a un sistema de bombeo entre cisterna y tanque.

Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Planta : PAH-1 | **Hoja: 1/5** | **Revisión** : 1
Sector : Servicios | **Grupo: 2** | **Coordinador** : Suarez Ignacio
Sistema : Sistema de Agua | **Fecha: 14-02-2007**
Subsistema : Bombeo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			14
Nº	**Descripción Componente**	**Función**	**Modo de Falla**	**Efecto**	**S**	**Causa de Fallo**	**O**	**Control actual**	**D**	**RPN**	**Recomendación/Tarea**	**Responsable**			
												Nombre	**Fecha**	**Frecuencia**	
1	Bomba de agua.	Elevar agua desde la cisterna al tanque superior (100 lt/min)	La bomba deja de impulsar agua.	Falta de agua en el tanque superior.	7	Rodamientos de la bomba trabados.	2	Análisis de vibraciones.	4	56	Continuar con análisis de vibraciones. Chequear los resultados de los últimos 3 meses	Ingeniero de Mantenimiento	15-3-04	60 días	
			Cañería tapada.	Reducción de caudal.	3	Filtro válvula de retención dañado.	3	Ninguna tarea.	10	90	Controlar válvula de retención y filtro.	Mecánico	15-3-04	180 días	
			Válvula de entrada estrangulada.	Reducción de caudal.	2	Se dejó válvula en posición inadecuada.	1	Ninguna tarea.	10	20	Ninguna rutina recomendada. Se podrá evaluar capacitación.	–	--	--	
			El motor no funciona.	Falta de agua en el tanque superior.	7	Motor quemado.	2	Ninguna tarea.	10	140	Realizar Arbol de fallos o Diagrama Causa-Efecto.	–	--	--	
						Conexiones bornera de motor, flojas.	2	Ninguna tarea.	10	140	Controlar ajuste de bornera.	Eléctrico	15-3-04	180 días	
			Vibración excesiva.	La vibración excesiva puede ocasionar rotura de acoplamiento	6	Acoplamiento desalineado.	5	Análisis de vibraciones.	4	120	Continuar con el análisis de vibraciones.	–	--	--	
					6	Falla incipiente en los rodamientos.	5	Análisis de vibraciones.	4	120	Continuar con el análisis de vibraciones.	–	--	--	
		Evitar pérdidas de agua.	Pierde agua por el sello mecánico.	Se pierde caudal y presión de agua.	3	Falla el sello.	3	Ninguna tarea.	10	90	Rutina de Inspección.	Mecánico	15-3-04	30 días	
			Pierde agua por las juntas.	Se pierde caudal y presión de agua.	3	Juntas flojas.	3	Ninguna tarea.	10	90	Rutina de Inspección.	Mecánico	15-3-04	30 días	
2	Medidor de nivel de cisterna.	Detener la bomba cuando el nivel de agua llega al límite inferior.	La bomba succiona en vacío.	La bomba gira en vacío, pudiéndose dañar sus componentes.	5	Sensor fallado en posición "cerrado".	2	Ninguna tarea.	10	100	Controlar sensor e instalar sistema de desconección automática.	Eléctrico	15-3-04	180 días	
		Permitir el arranque de la bomba cuando el nivel se encuentra por encima del límite inferior.	El sensor no es capaz de cerrar el circuito y arrancar la bomba.	Falta de agua en el tanque superior.	7	Sensor fallado en posición "abierto"	2	Ninguna tarea.	10	140	Controlar sensor.	Eléctrico	15-3-04	180 días	
3	Flotante de cisterna.	Cortar el ingreso de agua cuando se alcanza el límite superior.	La válvula no cierra la entrada de agua.	Se produce un derrame en la cisterna.	1	Asiento o guarnición de la válvula dañado.	4	Ninguna tarea.	10	40	Ninguna tarea recomendada.	–	--	--	
			Boya de flotante suelta o deteriorada.	Se produce un derrame en la cisterna.	1	Se pincha o desenrrosca la boya.	2	Ninguna tarea.	10	20	Ninguna tarea recomendada.	–	--	--	
4	Medidor de tanque superior.	Detener la bomba cuando el nivel de agua llega al límite superior.	La bomba sigue elevando agua.	Se produce un derrame en el tanque superior.	2	Sensor fallado en posición "cerrado".	2	Ninguna tarea.	10	40	Controlar sensor.	Eléctrico	15-3-04	180 días	
		Permitir el arranque de la bomba cuando el nivel llega al límite inferior.	El sensor no es capaz de cerrar el circuito y arrancar la bomba.	Falta de agua en el tanque superior.	7	Sensor fallado en posición "abierto"	2	Ninguna tarea.	10	140	Controlar sensor.	Eléctrico	15-3-04	180 días	
5	Cisterna.	Impedir el ingreso de materiales extraños.	Recubrimiento superior deteriorado.	Se contamina el agua en el tanque superio.	8	Tapa de cierre dañada.	2	Ninguna tarea.	10	160	Inspeccionar hermeticidad de la cisterna.	Mecánico	15-3-04	15 días	

Figura 5.2.4
Ejemplo de una hoja de análisis por FMEA.

5.2.4.2 HAZOP (Hazard and Operability Analysis)[1]

Es una técnica cualitativa orientada a identificar situaciones de riesgo. Parte de la hipótesis que todos los problemas de operación y los accidentes en general se producen como consecuencia de la desviación de ciertas variables de proceso. Puede aplicarse tanto en las etapas de diseño como en las de operación; para procesos continuos o intermitentes. Nació como un método de evaluación de riesgos en procesos químicos, y luego se extendió al resto de las industrias.

La asignación o valoración del riesgo, se fundamenta de acuerdo a la Probabilidad (P) y a la Severidad (S) de ocurrencia de los eventos. Se identifican los potenciales riesgos para la operación, para la seguridad del personal (propio y/o terceros), para la seguridad de terceros (fuera de las instalaciones analizadas) y para el medio ambiente.

Un equipo interdisciplinario – formado por personal idóneo de producción y mantenimiento y liderado por un facilitador – analiza y define sistemáticamente los potenciales riesgos de la instalación a través del estudio de las intenciones que forjaron el diseño, de las desviaciones que éste puede sufrir y de las posibles causas y consecuencias. Además, se evalúan las salvaguardas o las medidas contensivas que posee el sistema. El resultado final es una lista de recomendaciones fundamentadas por el grupo de trabajo, cuya implementación permitirá reducir el riesgo existente. Cada recomendación (técnica, operativa o administrativa) tendrá un responsable de asegurar que la misma se realice.

Podemos resumir que un HAZOP analiza sistemáticamente las causas y las consecuencias provocadas por las desviaciones de ciertas variables mediante la invocación de palabras *guías*, permitiendo que todas las desviaciones sean tenidas en cuenta. Brevemente, las etapas del procedimiento son las siguientes:

1. **Definir una matriz de riesgo**
   Esta etapa se hace por única vez y se aplica a todos los análisis HAZOP de una misma unidad productiva. Cada organización debe proponer el rango de Severidad y de Probabilidad de ocurrencia que mejor, y más equilibradamente, represente su realidad. Puede utilizarse algo similar a la matriz de riesgo mostrada en la figura 5.2.2.

2. **Definir el proceso a estudiar**
   Con la ayuda de diagramas de procesos, flujogramas y planos (P&ID), se delimita y establece claramente cuál será el proceso de análisis (ej.: Proceso de Molienda, Proceso de Elaboración, Proceso de Cocimiento, etc.), como también el alcance que tendrá. Se hace una descripción de la instalación, sus equipos y productos.

3. **Definir los nodos**
   En cada proceso se definen **nodos**. Un nodo es un área o subproceso (ej.: reactor de producto en elaboración, agua de alimentación, sistema de aire comprimido, sistema de alimentación de gas, sistema de seguridad, dispositivos de alarma, etc.) en el que se investigan las desviaciones de los parámetros o variables operativas. A los nodos se los numera y caracteriza según las variables de proceso (presión, caudal, temperatura, viscosidad, nivel, concentración, etc). El método se aplica sobre cada uno de los nodos. En algunos casos, las variables asociadas a cada nodo se identifican por medio de un diagrama de flujo.

Nodos	Parámetros de Diseño	Planos	ID del Equipo	Fecha	Rev. #
1. Sistema de Agua y Vapor	Producción: 8.000 Kgr/hr, Presión de trabajo: 12 bar (diseño 13 bar). Superficie de calefacción: 200 m^2, Vapor saturado, Temp.: 190°C, pH: 10.5 (de 10 a 11)	ER-ING2-0110 1768/008	Caldera C6.12.7: Humotubular, Bombas de Alimentación (dos) de 15 bar de presión de descarga y 12 m^3/hr, 15 HP	25/01/2007	2
2. Sistema de Combustible (Gas / Gas oil) y aire de combustión. Chimenea de gases	Presión Gas Combustible: 0.4 - 0.5 bar, Presión gasoil: 6 bar	ER-ING2-0110 1768/008	Caldera C6.12.7: Humotubular.	25/01/2005	2

Figura 5.2.5
Lista de nodos para un proceso de análisis HAZOP.

1 Ver bibliografía por obras de referencia y de consulta.

4. Definir los parámetros o variables de proceso

Un parámetro es una variable física de proceso o un aspecto general. Los parámetros específicos son: *presión, temperatura, caudal, nivel, pH*, etc. Los parámetros generales son: *oxidación, corrosión, erosión, expansión*, etc.

5. Definir las palabras guías

Las palabras guías se utilizan para estudiar la situación de cada uno de los parámetros. Se aplican tanto a parámetros físicos como a generales. Algunas de ellas son: *alto, bajo, más, nulo, menos, inverso, además de, diferente de*, etc.

El tratamiento de cada palabra permite saber cuáles serían las consecuencias si las variables de proceso se desvían de su estado normal de funcionamiento.

6. Constituir la lista de desviaciones

Con los parámetros y las palabras guías, y para cada nodo en particular, se establecen todas las potenciales desviaciones. Se buscan todas las posibles combinaciones entre palabra guía - variable de proceso, descartándose aquellas que no tengan sentido para un nodo determinado.

Nodos: 1. Sistema de Agua y Vapor					
Tipo:			Planos: ER-ING2-0110; 1768/008		
Parametros de Diseño: Producción: 8.000 Kgr/hr, Presión de trabajo: 12 bar (diseño 13 bar). Superficie de calefacción: 200 m², Vapor saturado, Temp.: 190°C, pH: 10.5 (de 10 a 11)			ID del Equipo: Caldera C6.12.7: Humotubular, Bombas de Alimentación (dos) de 15 bar de presión de descarga y 12 m³/hr, 15 HP		
Desviaciones	Palabras Guías	Parámetros	Datos de Diseño	Fecha	Rev. #
1. Alta Presión	Alto	Presión			
2. Baja Presión	Bajo	Presión			
3. Alta Temperatura	Alto	Temperatura			
4. Baja Temperatura	Bajo	Temperatura			
5. Alto Nivel	Alto	Nivel			
6. Bajo Nivel	Bajo	Nivel			
7. Alto pH	Alto	PH			
8. Bajo pH	Bajo	PH			
9. Alto Caudal	Alto	Caudal			
10. Bajo Caudal / Nulo	Bajo / Nulo	Caudal			
11. Caudal Inverso	Inverso	Caudal			
12. Composición		Composición			
13. Corrosión / Erosión		Corrosión / Erosión			
14. Pérdidas		Pérdidas			
15. Observaciones / Preocupaciones		Observaciones / Preocupaciones			

Figura 5.2.6
Lista de desviaciones para un proceso de análisis HAZOP.

7. Sesiones HAZOP y Hojas de Trabajo

Las sesiones son las reuniones de trabajo. Se constituye un equipo multidisciplinario liderado por un coordinador especialista en HAZOP. La metodología se sustenta en la experiencia de cada uno de los integrantes del equipo (de 3 a 5 miembros).

Trabajan con la ayuda de una planilla cuya información y columnas a completar son las siguientes: *nodo, desviación, causas, consecuencias, respuestas favorables del sistema (salvaguardas), valoración del riesgo, acciones* y *recomendaciones*.

En la columna correspondiente a las *respuestas del sistema*, se vuelcan todas las seguridades (salvaguardas) con las que cuenta, y que deberían actuar si se presentara la situación de desvío planteada en los pasos anteriores. Se pretende comprender, de esta forma, cómo debería responder el sistema ante el desvío. La figura 5.2.7 muestra un ejemplo de Hoja de Trabajo.

Nodos: 1. Sistema de Agua y Vapor								
Desviación: 1. Alta Presión								
Tipo:			Planos: ER-ING2-0110; 1768/008					
Parametros de Diseño: Producción: 8.000 Kgr/hr, Presión de trabajo: 12 bar (diseño 13 bar). Superficie de calefacción: 200 m^2, Vapor saturado, Temp.: 190°C, pH: 10.5 (de 10 a 11)			ID del Equipo: Caldera C6.12.7: Humotubular, Bombas de Alimentación (dos) de 15 bar de presión de descarga y 12 m^3/hr, 15 HP					
Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Matriz de riesgo			Recomendaciones	Responsable	Estado
			S	P	S x P			
1. Bloqueo en línea de salida de vapor	1. Daños estructurales. Posible pérdida de producción	1. Sistema de control (PC10)	Baja	2	Bajo			
	2. Posible explosión. Daño al personal	2. Presostatos de detención y arranque de caldera PSH9A. Presostato de detención P (muy alta) PSH9B	Severa	1	Medio			
		3. Válvulas de seguridad PSV24 A y B (Set a 13 Kgr/cm^2)						
		4. Capacitación de los Foguistas						
		5. Manual operativo de la caldera						
		6. Plan de certificación anual de caldera.						
		7. Permisos de Trabajo						
		8. Plan de control de equipos relevantes para seguridad						

Figura 5.2.7
Hoja de Trabajo de un proceso de análisis HAZOP.

8. Informe final y recomendaciones

Se recomienda finalmente la presentación de un informe en el que se resume la situación general estudiada, esquemas simplificados del proceso y un listado con las medidas a adoptar (recomendaciones) para controlar las situaciones de peligro. Las modificaciones propuestas se deberán estudiar posteriormente desde el punto de vista técnico - económico[1]. La línea base para el análisis se considera a partir de la *condición normal de proceso* establecida y los P&ID correspondientes.

Dentro de las medidas a adoptar puede ser necesario un rediseño de la instalación o un cambio en los procesos de operación.

En los proyectos de nuevas instalaciones, el HAZOP es una herramienta útil para detectar problemas durante la etapa de diseño. El mercado informático ofrece paquetes o soluciones que permiten realizar un tratamiento detallado de todos los pasos.

5.2.4.3 FTA (Fault Tree Analysis)

El análisis mediante un **Árbol de Fallos** es un método **analítico** y **deductivo** que tiene como finalidad simular las situaciones de causa y efecto que podrían conducir a una falla funcional **(evento analizado)**. Se ha desarrollado con profundidad en la industria nuclear, aeronáutica, militar, química y electrónica, para la edad temprana del diseño de los equipos.

Permite establecer el riesgo propio de cada una de las situaciones potenciales de falla. Es una técnica de carácter proactivo pues analiza las fallas o sus causas con anterioridad a que se manifiesten. Dentro de las causas, deben considerarse también los errores humanos.

Se parte, entonces, de un **hipotético suceso (evento final no deseado)** que se quiere evitar. De lo visto, se desprende que el evento final no deseado en un árbol de fallos, no es más que lo que conocemos del Capítulo 1 como **falla** o **falla funcional.**

Evento final no deseado = Falla Funcional

---

1 HAZOP es una técnica de análisis cualitativa que identifica categorías de riesgo, no los cuantifica. Para aquellos desvíos categorizados como "altos" o "muy altos", suele aplicarse un análisis LOPA (Layer of Protection Analysis).

Un árbol de fallos se realiza sobre eventos (fallas funcionales) que presumiblemente tengan mayor impacto en seguridad. Se procura establecer para cada uno, los caminos ascendentes de causa - efecto que sobre el sistema deben acontecer para culminar en el evento. La ventaja respecto a otros métodos es que hace posible el análisis simultáneo de múltiples causas. Es muy recomendable para instalaciones con elevada cantidad de sistemas de seguridad (redundantes o de protección).

El diagrama de árbol se estructura mediante operadores ó puertas lógicas. Para el análisis cuantitativo se asigna a cada suceso básico su probabilidad de ocurrencia, obteniendo finalmente, la de los sucesos intermedios y la del suceso final.

En técnicas como el RCM (Ver Capítulo 7) es factible aplicarlo como herramienta intermedia para estudiar los modos de falla complejos que podrían desencadenar en la falla funcional estudiada; recordar que en un FTA el evento final no deseado es la falla funcional.

Si bien comúnmente se aplica para situaciones en las cuales el evento planteado redunda en consecuencias muy graves, es útil también para casos en que se procura determinar el origen del suceso indeseado, aunque no sea tan grave.

El nexo entre los sucesos causa - efecto se establece, como se dijo, por medio de operadores lógicos, fundamentalmente AND y OR.

Símbolo	Descripción
	Evento o suceso básico. Es el punto máximo de análisis o apertura, a partir del cual no se buscan las causas y se puede definir su confiabilidad.
	Evento fuera del análisis. Concepto de "caja negra". Sus causas no se analizan por falta de información o porque no merecen la pena.
	Evento intermedio. La combinación de eventos básicos resulta en el evento intermedio por medio de las puertas lógicas.
	Puerta "Y". El suceso de salida ocurrirá sólo si ocurren todos los eventos de entrada.
	Puerta "O". El suceso de salida ocurrirá si ocurre uno o más de los eventos de entrada.
	Puerta "Y" prioritaria. El suceso de salida solamente ocurrirá si los sucesos de entrada ocurren pero con una determinada secuencia.
	Puerta "O" exclusiva. El suceso de salida ocurrirá sólo si ocurre uno de los sucesos de entrada, pero no dos o más de ellos.
	Puerta de Inhibición. El evento de salida sólo ocurrirá si ocurre la entrada pero, además, si se satisface cierta condición "x".

Tabla 5.2.3 Operadores lógicos utilizados para confeccionar un árbol de fallos.

A partir del evento no deseado, se deben ir concatenando hacia abajo en el árbol, los sucesos intermedios hasta llegar en sentido descendente a sucesos básicos **(causas raíz)** imposibles de seguir descomponiendo. A estos eventos básicos elementales se los asume **independientes** y tendrán, cada uno, cierta probabilidad de ocurrencia. Se los denomina **eventos "límite"** porque no "requieren" de otros para suceder.El **suceso no deseado** (falla funcional e hipótesis de análisis) es el resultado de la combinación lógica de todos los sucesos básicos descriptos en el árbol y vinculados por los operadores lógicos.

Ejemplo 5.2.2

A continuación se analiza, por medio de un árbol de fallos, un sistema con dos bombas B_1 y B_2 utilizadas para elevar agua desde una cisterna C hasta un tanque elevado T. La **función** principal del sistema es mantener el nivel de agua por encima de cierto nivel en T. El conjunto está concebido de manera que cualquiera de las bombas es capaz de elevar agua al tanque superior. La conmutación entre las bombas es automática.

Se encuentra instalada una válvula de retención R para evitar que las bombas trabajen en vacío. Luego, existe un grupo de 4 válvulas (V_1, V_2, V_3 y V_4) para operar / reparar el sistema. Entre otros medidores, hay uno de mínimo nivel S_1 en la cisterna C que impide el arranque de las bombas cuando el agua llega al nivel establecido para S_1. Por su parte, en el tanque T funciona otro medidor de nivel S_3 cuya función es detectar mínimo nivel y comandar el encendido de las bombas.

Una **falla funcional** para la función establecida es que no se mantiene el nivel de agua por encima de S_3 en el tanque superior. Se pretende, entonces, confeccionar el árbol de fallos y estimar la probabilidad para la falla funcional redefinida como: **"Falta agua en el tanque T"**.

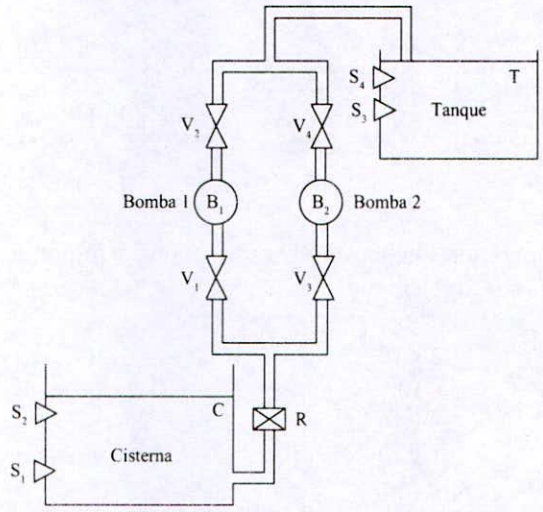


Figura 5.2.8
Diagrama funcional de un sistema de elevación de agua.

Los medidores de nivel S_1 y S_3 pueden fallar de dos maneras distintas (modos de falla), en "abierto" o en "cerrado". A continuación un resumen de las cuatro posibilidades, identificando en cada caso cuando se trata de un fallo evidente o de un fallo oculto.

- Falla **S_1 en abierto**: El sistema cree que no hay agua cuando hay **(Fallo Evidente)**
- Falla **S_1 en cerrado**: El sistema cree que hay agua cuando no hay **(Fallo Oculto)**
- Falla **S_3 en abierto**: El sistema cree que hay agua cuando no hay **(Fallo Evidente)**
- Falla **S_3 en cerrado**: El sistema cree que no hay agua cuando hay **(Fallo Oculto)**

Las dos únicas situaciones para los medidores de nivel (S_1 y S_3), que producen falta de agua en T, son las correspondientes a un fallo **evidente;** es decir, fallan en "abierto". Por su parte, las dos funciones ocultas protegen a las bombas de giro en vacío y de arranques intermitentes respectivamente.

Los modos de falla **ocultos**, entonces, no tienen consecuencia directa para la falta de agua en el tanque T, asumiendo que son éstos los únicos que se producen.

Teniendo en cuenta lo antedicho, y tomando como único evento no deseado la "Falta de agua en el tanque superior T", el árbol de fallos resulta según la figura 5.2.9.

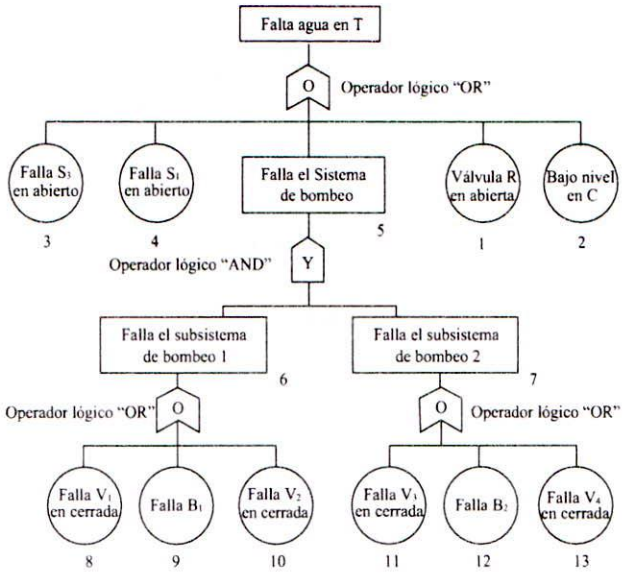


Figura 5.2.9
Árbol de fallos para un sistema de dos bombas.

Obsérvese el uso de los operadores lógicos AND y OR según corresponde. Suponiendo que la probabilidad de falla para cada uno de los elementos es:

- Medidor de nivel (S_1 ó S_3) $1{,}2 \times 10^{-5}$
- Válvula (V_1, V_2, V_3 ó V_4) 5×10^{-4}
- Bomba (B_1 ó B_2) $2{,}5 \times 10^{-3}$
- Válvula de Retención (R) $2{,}1 \times 10^{-2}$
- Falta de agua en C 4×10^{-4}

La probabilidad de que falle el subsistema de bombeo 1 será:

$$P_{(\text{Falla Subsistema 1})} = P_{(\text{Falla V1 en cerrada})} + P_{(\text{Falla B1})} + P_{(\text{Falla V2 en cerrada})}$$

$$P_{(\text{Falla Subsistema 1})} = (5 \times 10^{-4}) + (2{,}5 \times 10^{-3}) + (5 \times 10^{-4}) = 0{,}0035$$

De la misma manera, para el segundo subsistema de bombeo:

$$P_{(\text{Falla Subsistema 2})} = (5 \times 10^{-4}) + (2{,}5 \times 10^{-3}) + (5 \times 10^{-4}) = 0{,}0035$$

Así, la probabilidad de falla de ambos subsistemas de bombeo en simultáneo es:

$$P_{(\text{Falla Sistema de bombeo})} = 0{,}0035 \times 0{,}0035 = 0{,}00001225$$

De acuerdo a la figura 5.2.9, el suceso final ocurre si se manifiesta cualquiera de los eventos 1, 2, 3, 4 ó 5, por lo tanto:

$$P_{(\text{Falta agua en T})} = (2{,}1 \times 10^{-2}) + (4 \times 10^{-4}) + (1{,}2 \times 10^{-5}) + (1{,}2 \times 10^{-5}) + 0{,}00001225$$

$$P_{(\text{Falta agua en T})} = 0{,}02143625 = 2{,}14\%$$

El conjunto mínimo de fallos estará dado por el camino con mayor probabilidad de ocurrencia que deriva en el suceso final no deseado. Listando en orden decreciente las probabilidades para los 5 eventos básicos que derivan en la falla funcional, se tiene:

1) $P_{(\text{Falla válvula de retención})} = 2{,}1 \times 10^{-2} = \mathbf{0{,}021}$

2) $P_{(\text{Bajo nivel en C})} = 4 \times 10^{-4} = \mathbf{0{,}0004}$

3) $P_{(\text{Falla S3 en abierto})} = 1{,}2 \times 10^{-5} = \mathbf{0{,}000012}$

4) $P_{(\text{Falla S1 en abierto})} = 1{,}2 \times 10^{-5} = \mathbf{0{,}000012}$

5) $P_{(\text{Falla Sistema de bombeo})} = \mathbf{0{,}00001225}$

Nótese finalmente que la probabilidad total de falla para el suceso final no deseado (Falta de agua en el tanque T), se encuentra constituido fundamentalmente por el evento 1 "Falla válvula de retención en abierto", aportando casi el 98% de la probabilidad de ocurrencia.

Según lo visto en este ejemplo, existe la posibilidad de plantear configuraciones serie como paralelo con las probabilidades de falla de cada elemento, desde el punto de vista del armado de la red de análisis. Pero se debe prestar mucha atención en los análisis de probabilidad de falla porque cuando se habla de "configuración" es desde el punto de vista de la probabilidad condicional de falla de cada componente del sistema, y no de su arquitectura o disposición física. Es fundamental no confundir la disposición de los elementos del sistema con la disposición (serie o paralelo) de los modos de falla. De acuerdo a cómo se consideren los fallos, se aumentará o disminuirá la probabilidad condicional de falla total del conjunto.

Veamos el siguiente ejemplo, donde por medio de un arreglo en serie de dos elementos, se puede aumentar la seguridad del sistema con aumento de la probabilidad condicional de falla.

Ejemplo 5.2.3 [1]

Supóngase un sistema eléctrico con un interruptor cuya función es cerrar y abrir un circuito. El interruptor puede fallar por dos modos de falla; en abierto o en cerrado (cortocircuito). Se considera que el primer modo de falla tiene un MTTF de 50 años y el segundo 100 años.

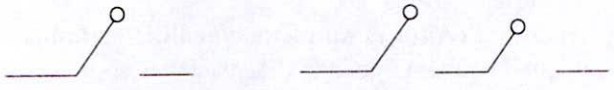
$MTTF_{(1)} = 50$ años (fallo por abierto)

$MTTF_{(2)} = 100$ años (fallo por cortocircuito)

$\lambda_1 = 1/MTTF_{(1)} = 0{,}02$ (fallo por abierto)

$\lambda_2 = 1/MTTF_{(2)} = 0{,}01$ (fallo por cortocircuito)

Si sólo el segundo modo de falla (cortocircuito) tiene consecuencias para la seguridad, pues produce un cierre súbito en el circuito, entonces habrá una diferencia entre la **Probabilidad de Falla** y la probabilidad de que el sistema provoque daños graves; es decir, la **Seguridad**. En la figura 5.2.10a se describe el interruptor referido.



a) 1 interruptor b) 2 interruptores

Figura 5.2.10
a) un interruptor;
b) dos interruptores en serie.

Si el análisis se remite únicamente a las tasas de falla (λ) para cualquier instante dado (no se conoce la ley de distribución de fallos), se tiene:

- $\text{Seguridad}_{(1\text{ interruptor})} = 1 - \lambda_2 = 1 - 0{,}01 = \mathbf{99\%}$
- $\text{Pnf}_{(1\text{ interruptor})} = 1 - (\lambda_2 + \lambda_1) = 1 - (0{,}02 + 0{,}01) = \mathbf{97\%}$

---

1 Ejemplo adaptado de "Método del árbol de fallas" de Introducción al Proyecto de Ingeniería de Enrique Villamil García y Miguel J. García Hernández, página 124.

Si fuese necesario aumentar la **Seguridad**, se podría proponer una configuración con dos interruptores en serie, como muestra la figura 5.2.10b. De esta manera, para que las consecuencias sean catastróficas, se tendría que producir el "fallo por cortocircuito" en los dos interruptores simultáneamente. Nótese entonces que, para el cálculo de la **Seguridad**, los dos modos de falla deberían considerarse en paralelo aunque los elementos se hayan ubicado en serie; así:

- $\text{Seguridad}_{(2\ \text{interruptores})} = 1 - (\lambda_2 \times \lambda_2) = 1 - (0{,}01 \times 0{,}01) = 1 - 0{,}0001 = \mathbf{99{,}99\%}$

Por su parte la probabilidad total de falla, será una combinación serie/paralelo. La falla por "abierto" en los dos interruptores, es serie; a su vez, estos dos modos de falla estarán en serie con el paralelo del otro modo de falla en los dos interruptores. Esto es:

- $\text{Pnf}_{(2\ \text{interruptores})} = 1 - [\lambda_1 + \lambda_1 + (\lambda_2 \times \lambda_2)] = 1 - 0{,}0401 = \mathbf{95{,}99\%}$

Disminuyó $\text{Pnf}_{(2\ \text{interruptores})}$ **(Probabilidad Condicional de no Falla)** de 97% a 95,99%, pero aumentó su **Seguridad** de 99% a 99,99%. Esto se debe a que la "confiabilidad" considera todos los posibles modos de falla de una instalación, mientras que la "seguridad" sólo aquellos que pueden conducir a consecuencias graves.

Cabe destacar que este análisis se remite exclusivamente al manejo de las tasas de falla. Suele simplificarse y denominarse **"Confiabilidad"** a la probabilidad condicional de no falla, según se mencionó en el párrafo anterior.

En rigor, sabemos que la Confiabilidad (Capítulo 1) nos muestra la probabilidad de falla de un sistema en función del tiempo. La realidad es que aunque los componentes del sistema respondan a una ley de distribución determinada, muchas veces el cálculo de la confiabilidad para todo el sistema debe estimarse por medio de métodos de simulación. Por simplificación, a partir de ahora la probabilidad condicional de no falla la denominamos Confiabilidad, o simplemente Fiabilidad.

Es apropiado mencionar algunas consideraciones más. En primer lugar los valores de probabilidad de falla para los sucesos básicos se asumen conocidos y muy bajos. Además, todos los sucesos se manifiestan en forma independiente; es decir, la ocurrencia de uno no tiene influencia sobre la ocurrencia de otro. Así, la probabilidad de un evento como consecuencia de un bloque lógico "O" se puede obtener directamente como la suma de las probabilidades de los sucesos que lo provocan. Por su parte, para un bloque lógico "Y", la ocurrencia es el producto de las probabilidades de entrada.

Finalmente, se puede decir que el **FTA (Fault Tree Analysis)** es una herramienta que debe utilizarse por personal técnico altamente calificado y que, además, conozca la metodología. Generalmente el grupo de trabajo que se constituye para efectuar un árbol de fallos es el mismo que desarrolla el proceso de creación u optimización de rutinas de mantenimiento a través del RCM. En la actualidad existen paquetes informáticos comerciales que permiten un manejo rápido de las variables cualitativas y cuantitativas de la técnica. Dichos programas facilitan la combinación de los sucesos compuestos mediante la aplicación del álgebra de Boole y sus propiedades.

5.2.4.4 ETA (Event Tree Analysis)

El análisis mediante un **Árbol de Eventos** es un método **analítico** e **inductivo** que estructura la secuencia de eventos básicos que finalmente pueden desencadenar en un accidente concreto. Consiste en proponer un evento **disparador** no deseado, **modo de falla** según lo visto en el Capítulo 1, del que se conoce la frecuencia de ocurrencia y luego, analizar las consecuencias que ejerce sobre el resto del conjunto y teniendo en cuenta la efectividad de las seguridades, controles, barreras, protecciones contensivas, alarmas, etc. Por tanto, se trata de un método de gran ayuda para analizar las consecuencias de un fallo. Cada evento iniciador que se propone, da origen a un árbol de eventos.

Es una herramienta adecuada para realizar análisis cualitativos y cuantitativos, y verificar si los dispositivos redundantes o de protección son realmente efectivos. Permite estudiar los riesgos del sistema, analizando los procesos cuyos acontecimientos se presentan de una manera secuencial y bajo la asunción

de ciertas hipótesis. Se representa por medio de un esquema arbóreo horizontal que considera las cadenas causa - causa de los eventos que llegan finalmente a capitalizarse en una falla, permitiendo conocer lo que podría haber sucedido de concretarse la concatenación de los eventos planteados. Como se dijo, el diagrama gráfico secuencial se desarrolla a partir de un suceso disparador cuya incidencia o consecuencias pueden ser significativas. La técnica se acompaña matemáticamente del correspondiente análisis probabilístico.

El proceso "Árbol de Eventos" se desarrolla de acuerdo a las siguientes etapas:

1. **Conocimiento del sistema propuesto y descripción del contexto**
   El grupo de trabajo constituido para confeccionar el árbol de eventos, debe documentar y estudiar todo lo concerniente al funcionamiento y contexto operativo del sistema. Se deben describir y entender los posibles estados de falla que pueden desencadenarse sobre la instalación.
   Vale en este punto aprovechar la experiencia del personal implicado con la ayuda del historial de incidentes, si lo hubiera. De lo contrario, se recomienda utilizar historial de equipamiento similar.

2. **Selección de los eventos "disparadores" (Modos de Falla)**
   Será necesario confeccionar una lista con los eventos a analizar (modos de falla). Éstos pueden obtenerse, bien de sucesos ya ocurridos en el sistema, o bien de otros sistemas con características similares.
   Como se mencionó en este capítulo, y seleccionado un modo de falla en la instalación como evento disparador, puede ocurrir que se requiera la intervención de sistemas redundantes o de protección capaces de impedir o minimizar la consecuencia final del accidente (sistemas de seguridad).

3. **Definición de los efectos y descripción de las funciones de seguridad**
   En la sección 5.1.1 se describieron en forma detallada los sistemas de seguridad. Se mencionó la existencia de *Dispositivos Redundantes* y *Dispositivos de Protección*. Estos dispositivos se instalan para actuar ante la ocurrencia del evento disparador propuesto. En este punto, entonces, se deben describir tanto la **secuencia de efectos** que se deberían combinar para impedir o controlar el evento final no deseado, como las funciones que los **dispositivos de seguridad** (redundancias y protecciones) deben satisfacer para evitar el suceso.
   Los potenciales efectos y las funciones de seguridad previstas, deben documentarse en forma simplificada y de acuerdo al orden lógico de ocurrencia.

4. **Construcción del Árbol de Eventos**
   Partiendo del evento disparador se construye, de izquierda a derecha, un diagrama de árbol cuyas ramas se abren en dos (sólo se considera el éxito o fracaso del suceso). Hacia arriba, si el evento siguiente es exitoso; hacia abajo, cuando se trata de un fracaso (fallo). Luego, se prosigue horizontalmente hacia la derecha hasta el próximo suceso que obligará a una nueva bifurcación.
   La probabilidad total de cada uno de los eventos ubicados a lo largo del árbol, será igual a 1. Vale decir que cada evento tiene una probabilidad de fracaso y una de éxito, cuya suma es la unidad (figura 5.2.12).

5. **Categorización de las respuestas no deseadas**
   Solamente se calculará la probabilidad de ocurrencia de la combinación de eventos que deriven en una situación no controlada. Esto nos dará una lista de probabilidades que deberán analizarse una a una, en función del tipo de consecuencias producidas.

6. **Estimación de la probabilidad de cada secuencia del árbol de eventos**
   La estimación de las probabilidades de falla de cada una de las secuencias de las ramas del árbol no es tarea sencilla. Como se menciona en el ejemplo que se ilustra a continuación, la suma de la probabilidad de éxito y de fracaso para cada secuencia, es igual a la unidad.
   En primer lugar se recurre al historial de tasas de falla que se disponga del equipo analizado. De no contar con suficiente información, pueden consultarse instalaciones de características similares.
   Si el suceso en cuestión es de alta complejidad técnica, se aconseja utilizar un árbol de fallos para cuantificar su probabilidad de ocurrencia, y luego volver al árbol de eventos. Obsérvese que el árbol de fallos es una herramienta complementaria para esta técnica.

7. Cuantificación de las situaciones descontroladas

La probabilidad de cada una de las situaciones se obtiene como el producto de la probabilidad (de éxito o fracaso según sea el caso) de cada una de las secuencias del árbol, incluyendo el evento disparador inicial (modo de falla).

Cada rama horizontal tendrá una probabilidad de ocurrencia; es necesario, por lo menos, calcular esta probabilidad para las situaciones desfavorables. En el ejemplo siguiente estos eventos se indican con círculos rellenos de color gris.

Ejemplo 5.2.4

Se intenta analizar, por medio de un árbol de eventos, la falla de un sistema de control de temperatura en un reactor químico. Será útil determinar, a su vez, la combinación de sucesos que tienen que desencadenarse para contener o minimizar sus consecuencias.

El reactor químico posee, entre otros elementos, un recipiente donde se aloja el producto y un sistema de calentamiento por medio de vapor para llevar adelante el proceso (figura 5.2.11). Dado que la masa de producto debe mantenerse entre ciertos límites, pero fundamentalmente no sobrepasar los 80°C, funciona un sistema de control de temperatura. Este sistema de control posee una lógica que gobierna la apertura y cierre de válvulas de producto y de vapor, en forma automática. Si falla el sistema de control y la temperatura de la masa llega a los 90°C, debe desecharse la carga con las consecuencias económicas que esto implica y el tiempo que insume la extracción de producto y limpieza del reactor. Para evitarlo, hay instalados dispositivos de protección por sobre calentamiento.

Existe una indicación visual local en el área de trabajo (II_{t1}) que muestra permanentemente la temperatura de la masa en proceso. Si el operador del sector visualiza que la temperatura sobrepasa los 80°C, debe actuar inmediatamente tomando las medidas correctoras necesarias que incluyen el diagnóstico del problema y el eventual cierre en forma manual de la válvula de vapor V_1.

También hay una protección interruptiva (T_{t2}), independiente de la anterior indicación, que se activa cuando la temperatura alcanza el valor t_2 = 85°C. Esta protección interrumpe la alimentación de vapor cerrando automáticamente la válvula V_2 del sistema de calentamiento. Si le fuese imposible al operador accionar la válvula manual V_1, todavía tendrá la posibilidad de interrumpir el ingreso de vapor accionando la válvula del colector principal V_6, habiendo verificado antes que no haya funcionado la protección interruptiva de T_{t2}.

Se considera para este ejemplo la secuencia lógica de daño, a la masa de producto por sobre temperatura y no por baja temperatura.

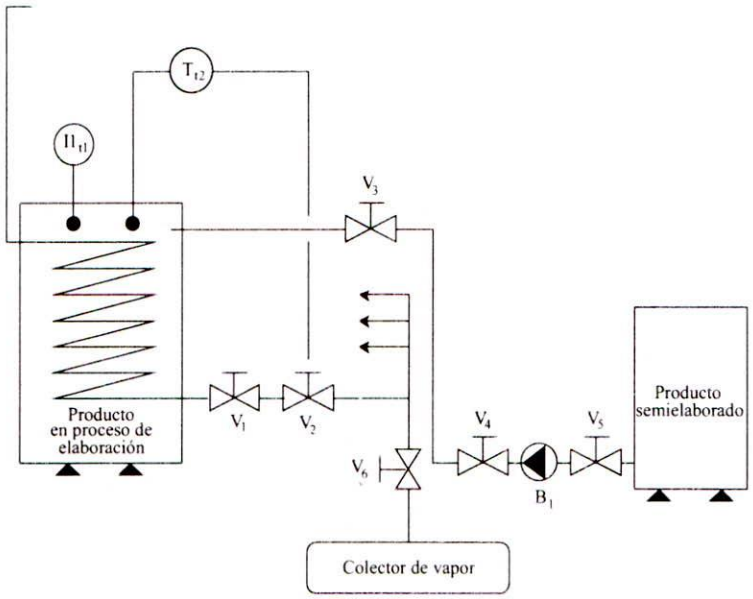


Figura 5.2.11 Sistema de control de temperatura en un reactor químico de producto.

Trazar el árbol de eventos para las indicaciones y los sistemas de protección existentes, si las probabilidades de fallo de cada evento son las mostradas en la tabla 5.2.4.

Falla del indicador II_{t1}	$1{,}67 \times 10^{-2}$
Falla humana en detectar y actuar sobre II_{t1}	$2{,}5 \times 10^{-1}$
Falla accionamiento válvula V_1	$4{,}5 \times 10^{-3}$
Falla del control de temperatura T_{t2}	$2{,}1 \times 10^{-2}$
Falla accionamiento válvula V_2	$4{,}5 \times 10^{-3}$
Falla al actuar la válvula V_6	$8{,}5 \times 10^{-4}$

Tabla 5.2.4
Probabilidad de falla para los eventos del ejercicio anterior.

Con estos valores de probabilidad, el árbol de eventos queda constituido según la figura 5.2.12.

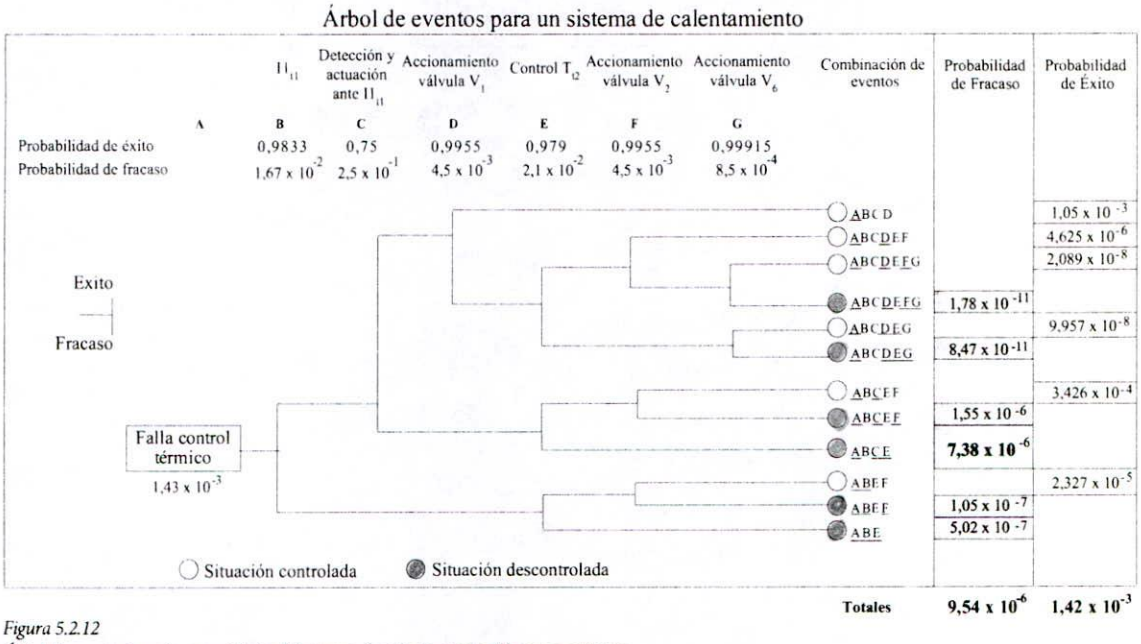


Figura 5.2.12
Árbol de eventos para las seguridades del sistema de calentamiento del reactor químico.

La probabilidad de los eventos desfavorables (situación no controlada), se obtiene con el producto de las probabilidades de cada una de las situaciones de éxito o fracaso, según sea el caso.

$$P(\underline{A}BC\underline{D}E\underline{F}\underline{G}) = P(\underline{A}) \times P(B) \times P(C) \times P(\underline{D}) \times P(E) \times P(\underline{F}) \times P(\underline{G})$$

$$P(\underline{A}BC\underline{D}E\underline{F}\underline{G}) = (1{,}43 \times 10^{-3}) \times (0{,}9833) \times (0{,}75) \times (4{,}5 \times 10^{-3}) \times (0{,}979) \times (4{,}5 \times 10^{-3}) \times (8{,}5 \times 10^{-4})$$

$$P(\underline{A}BC\underline{D}E\underline{F}\underline{G}) = 1{,}78 \times 10^{-11}$$

De la misma manera se obtienen los valores para las restantes situaciones desfavorables, como se muestra en la misma figura 5.2.12.

Por su parte, para estimar la **probabilidad de desechar todo el producto del reactor**, se deben sumar las probabilidades de los eventos indeseados. Así,

$$P_{(\text{desechar el producto})} = 1{,}78 \times 10^{-11} + 8{,}47 \times 10^{-11} + 1{,}55 \times 10^{-6} + 7{,}38 \times 10^{-6} + 1{,}05 \times 10^{-7} + 5{,}02 \times 10^{-7}$$

$$P_{(\text{desechar el producto})} = \mathbf{9{,}54 \times 10^{-6}}$$

Como comprobación final, se puede verificar que la suma de todas las probabilidades favorables y desfavorables, dan como resultado la probabilidad del evento disparador o modo de falla *(Falla del control térmico)*.

$$P_{(Total)} = P_{(Fracaso)} + P_{(Éxito)} = 9{,}54 \times 10^{-6} + 1{,}42 \times 10^{-3} = \mathbf{1{,}43 \times 10^{-3}}$$

Pueden resumirse las herramientas de Gestión estudiadas hasta aquí para el Análisis de Riesgo, por medio del siguiente esquema.

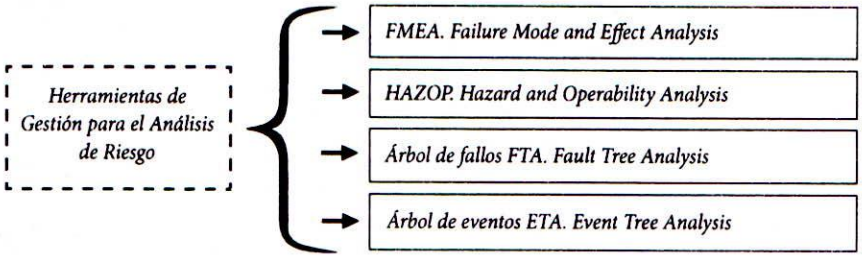


Figura 5.2.13 Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo.

5.3 Frecuencia para las Rutinas Detectivas

Antes de desarrollar la metodología y las ecuaciones para definir el espacio de tiempo más apropiado entre intervenciones detectivas, se hace necesario hacer algunas consideraciones.

El mantenimiento detectivo pone de manifiesto las fallas operacionales o funcionales (averías) de los elementos redundantes o de protección causadas por fallos ocultos. Su finalidad es detectar dichos fallos, para luego repararlos y disminuir al mínimo la probabilidad de falla funcional simultánea. Pero un dispositivo, actuando como elemento redundante o de protección, generalmente tiene más de un posible modo de falla, si tenemos en cuenta todas las partes que lo constituyen. Por ello, hay que asegurar que la tarea cubra todos los modos de falla que sobre el dispositivo pueden aparecer.

En la medida que las condiciones técnicas lo permitan, se recurre a las verificaciones llamadas en **"caliente"**. Una prueba en caliente es aquella que chequea la función en su totalidad (*completa*). Por ejemplo, los sistemas eléctricos de seguridad están constituidos por varios elementos: sensores, cables, interruptores, circuito eléctrico, lógica, etc. Si se establece una tarea detectiva sólo para el sensor, podrá aparecer un modo de falla sobre el resto de los elementos que pase desapercibido. Para evitar esta posibilidad, y si es técnicamente posible, se prefiere chequear al sistema completamente. Podrá ser suficiente simular cierta condición de proceso y así establecer la funcionalidad del dispositivo de protección.

Ejemplo 5.3.1

Tomemos por caso el ejemplo propuesto para el reductor del punto 1.2.1 del Capítulo 1. Dentro de sus elementos se tiene un sistema de control que asegura un mínimo de presión de aceite para la lubricación de mecanismos vitales. Comprobar el funcionamiento únicamente del presostato, no proporcionaría garantías suficientes de funcionalidad para todo el conjunto. Dentro de lo posible, deberá simularse una condición de baja presión de aceite y ver si efectivamente el sistema completo cumple la función establecida (alarmar, detener el reductor, etc).

Otra consideración de importancia para la ejecución de estas rutinas, es evitar los desarmes o intervenciones que puedan introducir indisponibilidad sobre los propios elementos a controlar. Es de amplio conocimiento que muchas tareas de reparación o de verificación significan una **"invasión"** a la condición básica del componente (aumenta considerablemente su probabilidad de falla por mortalidad infantil).

En este sentido, el elemento a chequear puede dañarse trayendo aparejado un aumento de probabilidad para la falla simultánea. Vale decir que, cualquier verificación detectiva de disponibilidad debe hacerse asegurando que el componente funcionará correctamente cuando inicie su servicio. De todas formas, existen situaciones en las que se hace imposible realizar chequeos funcionales completos. Normalmente por cuestiones de seguridad, simular ciertas condiciones de proceso se torna extremadamente peligroso, aumentando el riesgo para la seguridad de las personas, el medio ambiente o sencillamente el propio sistema productivo.

A continuación, en la figura 5.3.1, se resumen las condiciones bajo las cuales no es aconsejable la aplicación de rutinas detectivas.

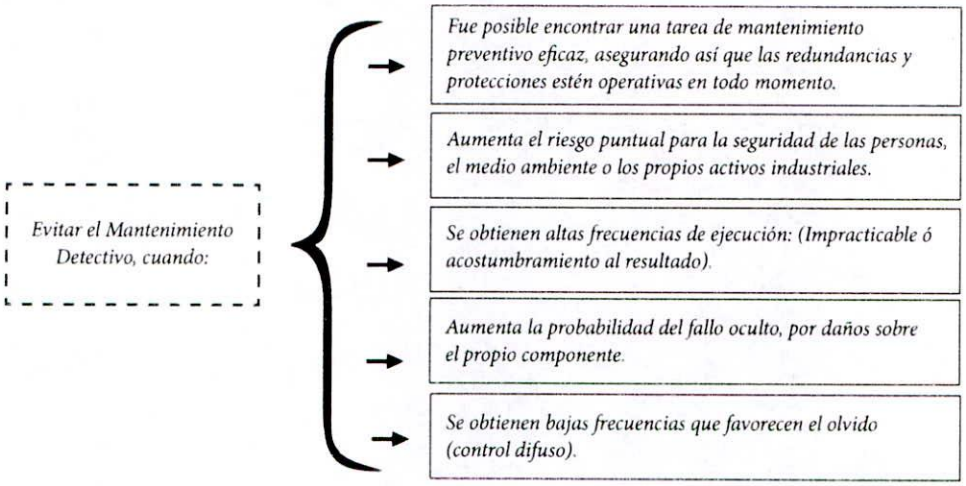


Figura 5.3.1 Condiciones bajo las que no es conveniente realizar rutinas detectivas.

Por último, se destacan algunas hipótesis tenidas en cuenta a partir de ahora para llevar adelante el análisis de las frecuencias de los chequeos funcionales (Mantenimiento Detectivo).

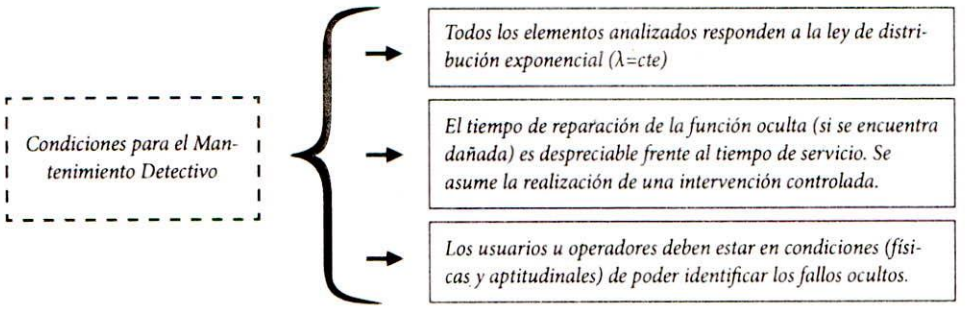


Figura 5.3.2 Condiciones asumidas para la realización del Mantenimiento Detectivo.

Si el tiempo de reparación es significativo frente al de operación normal, el sistema protegido estará desprovisto de respaldo durante mucho tiempo. Se deberá entonces contar con algún otro sistema alternativo que reemplace a la función de seguridad o bien retirar de servicio completamente todo el conjunto hasta tanto se haya subsanado el fallo sucedido sobre la redundancia o sobre la protección.

5.3.1 Disponibilidad Intrínseca

Observando la figura 5.1.4, la probabilidad condicional de que se produzca una falla simultánea para cierto intervalo de tiempo, es P_{fs}. Esta probabilidad, y para cualquier sistema dotado de protección, es función de la probabilidad de que falle la función o el equipo protegido cuando el dispositivo de seguridad se encuentra averiado.

Más precisamente, la probabilidad de falla simultánea (P_{fs}) es el producto de la probabilidad de que el dispositivo de protección esté averiado (P_{ds}) y la probabilidad de que falle la función protegida (P_{fp}).

La probabilidad de que falle la función protegida es la inversa del tiempo medio entre sus fallos ($MTBF_{fp}$); es decir, la tasa de falla (λ_{fp}).

$$P_{fp}\,[\%] = \lambda_{fp} = 1 / MTBF_{fp} \qquad (5.3.1)$$

A su vez, la probabilidad de que el dispositivo de protección se encuentre en estado de avería en cualquier momento del intervalo considerado, se mide de acuerdo al porcentaje de tiempo que permanezca averiado durante dicho período, esto es, el tiempo de indisponibilidad porcentual I_{ds} [%].

$$P_{ds}\,[\%] = I_{ds}\,[\%] = \lambda_{ds} = 1 / MTBF_{ds} \qquad (5.3.2)$$

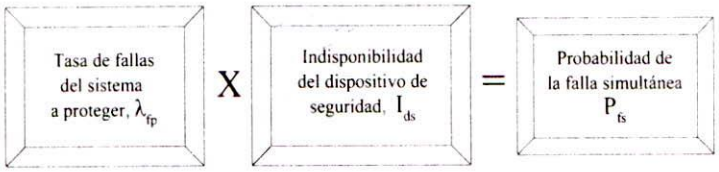


Figura 5.3.3 Probabilidad de la falla simultánea[1].

$$P_{fs} = \lambda_{fp} \cdot I_{ds} \qquad (5.3.3)$$

Además,

$$P_{fs}\,[\%] = \lambda_{fs} = 1 / MTBF_{fs} \qquad (5.3.4)$$

---

1 Como referencia ver Safety, Reliability and Risk Management[1995], Sue Cox and Robin Tait página 37 y Norma MIL-2173 (AS) página 58.

Ejemplo 5.3.2

Supongamos un arreglo cuyo equipo al que se desea proteger posee un tiempo medio entre fallas de 5 años. Si, además, el fallo que lo provoca es aleatorio (distribución exponencial), entonces la probabilidad de que falle en cualquier momento es 0,2 (tasa de fallas λ = 1 fallo / 5 años = 0,2). Si esta función se encuentra respaldada por una redundancia pasiva cuya función se cree que tiene un tiempo promedio de disponibilidad del 90%, entonces la probabilidad para la falla funcional simultánea (P_{fs}) es:

$$P_{fs} = 0{,}2 \times (1 - 0{,}9) = 0{,}2 \times 0{,}10 = 0{,}02 = \mathbf{2\%}$$

Se desprende, entonces, que fijando y estableciendo la probabilidad tolerada para la falla simultánea P_{fs}, y conociendo la tasa de fallas del equipo a resguardar ($\lambda_{fp} = P_{fp}$), podemos calcular la máxima probabilidad de falla tolerada para el dispositivo de protección, I_{ds}. Esto último establece claramente que nuestra atención debe centrarse en garantizar que la probabilidad de falla del dispositivo de seguridad no sobrepase el valor de P_{ds}, es decir I_{ds}.

Recordar además del Capítulo 1 que, si el elemento de protección es único, responde a un comportamiento del tipo exponencial y cuenta con más de un modo de falla, entonces la tasa de falla total deberá calcularse teniendo en cuenta las tasas de falla de cada uno de sus modos de falla. Esto es,

$$\lambda_{ds\,(Total)} = 1 / MTBF_{ds(1)} + 1 / MTBF_{ds(2)} + \ldots\ldots + 1 / MTBF_{ds(n)} \qquad (5.3.5)$$

Las posibles fuentes para estimar los $MTBF_{ds}$ son el historial de inspecciones detectivas (si lo hubiere) y las *tablas de falla en demanda* como, por ejemplo, las provistas por OREDA®[1].

5.3.2 Estimación del intervalo entre Inspecciones

La frecuencia entre inspecciones debe garantizar la disponibilidad requerida en los dispositivos redundantes o de protección para, consecuentemente, disminuir la probabilidad de falla simultánea. Es importante destacar que lo **más apropiado** es contar con una tarea proactiva que asegure la disponibilidad del dispositivo de respaldo en valores cercanos al 100%. Pero en ocasiones esto no es posible y es necesario implementar una búsqueda de fallos ocultos que consiste en **verificar regularmente la disponibilidad de la función oculta**.

La verificación se hará a intervalos regulares de tiempo (t_{ID}), directamente relacionados con los siguientes tres parámetros ya vistos[2].

a) la probabilidad aceptada o tolerada para la falla simultánea, P_{fs}
b) la tasa de falla o demanda del equipo a resguardar, λ_{fp}
c) la indisponibilidad permitida al dispositivo redundante o de protección, I_{ds}

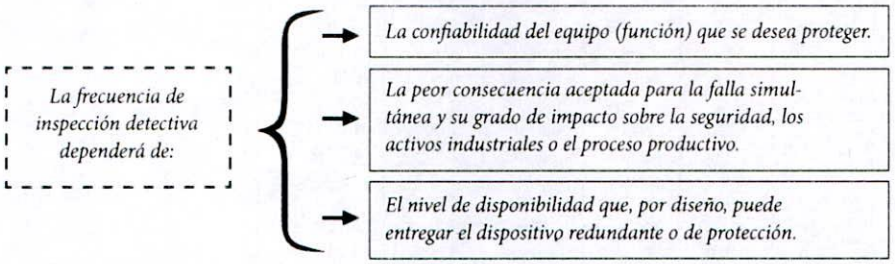


Figura 5.3.4 Factores que afectan la frecuencia de inspección detectiva.

Piense el lector lo siguiente. En general se tendrá una rutina detectiva para cada fallo oculto, independientemente del nivel (posición en el árbol de equipos de Planta) en que se encuentre el componente. Consecuentemente, la frecuencia de inspección detectiva estará en función de la probabilidad tolerada para la falla simultánea **puntual** analizada.

---

1 OREDA® Offshore Reliability Data. Ver referencia bibliográfica.
2 RCMII Reliability Centred Maintenance de John Moubray[2004], página 176 y Safety, Reliability and Risk Management[1998] de Sue Cox and Robin Tait, página 37.

Esto significa, por ejemplo, que si un amplio sector de Planta tolera un accidente muy grave (falla simultánea) en 10.000 años, no será apropiado tomar este valor para calcular el tiempo de inspección de un componente aislado que se encuentra 4 niveles debajo del sector de Planta indicado. En realidad, la suma de los ($1/MTBF_i$) de cada uno de los niveles deberá ser equivalente a la probabilidad tolerada para el accidente muy grave dado en el nivel superior, ($1/MTBF_{Total}$). Ver Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo, Sección 5.2.3.

Nota: Algunas de las ecuaciones y ejemplos de esta sección están basados en el capítulo correspondiente a "Intervalo de Búsqueda de fallos" del libro RCMII de John M. Moubray [2004].

Aproximación lineal para la ley de distribución exponencial

Sabemos que la probabilidad de falla acumulada F(t) *(desconfiabilidad)* para un elemento cuya distribución es del tipo exponencial, está dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/MTBF)} = 1 - e^{-\lambda t}$$

Es posible, sin embargo, aceptar una aproximación para dicha distribución, si los valores de la función F(t) no superan el 5%, tal que:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/MTBF)} = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t$$

Asumiendo, además, que los dispositivos redundantes o de protección responden a una distribución del tipo exponencial (fallos aleatorios) durante su periodo de stand-by, resulta:

$$F(t) = 1 - C(t) \approx \lambda t \qquad (5.3.6)$$

Ejemplo 5.3.3

La tabla siguiente muestra en la columna indicada con la flecha, el cálculo de F(t) (probabilidad de falla del dispositivo de seguridad) según la ecuación completa $1 - C_{ds}$, y la forma aproximada mostrada como "A_{prox}" en la columna adyacente. Puede apreciarse que mientras A_{prox} es menor al 5%, la divergencia entre $1 - C_{ds}$ y A_{prox} no resulta significativa.

Si MTBF = 600 meses

Tiempo				↓	↓	
Meses	Días	C_{ds}	$1 - C_{ds}$	A_{prox}	% MTBF	
0,01	0,3	100,00%	0,002%	0,002%	0,002%	
0,12	3,6	99,98%	0,020%	0,020%	0,020%	
0,15	4,5	99,98%	0,025%	0,025%	0,025%	
0,24	7,2	99,96%	0,040%	0,040%	0,040%	
0,3	9,0	99,95%	0,050%	0,05%	0,05%	
0,6	18,0	99,90%	0,100%	0,10%	0,10%	
1	27,0	99,85%	0,150%	0,15%	0,15%	
1	30,0	99,83%	0,167%	0,17%	0,17%	
1,2	36,0	99,80%	0,200%	0,20%	0,20%	
1,5	45,0	99,75%	0,250%	0,25%	0,25%	
2,4	72,0	99,60%	0,399%	0,40%	0,40%	
3,0	90,0	99,50%	0,499%	0,50%	0,50%	
6	180,0	99,00%	0,995%	1,00%	1,00%	
9	270,0	98,51%	1,49%	1,50%	1,50%	
12,0	360,0	98,02%	1,98%	2,00%	2,00%	
15,0	450,0	97,53%	2,47%	2,50%	2,50%	
16,7	501,0	97,26%	2,74%	2,78%	2,78%	
18	540,0	97,04%	2,96%	3,00%	3,00%	
24	720,0	96,08%	3,92%	4,00%	4,00%	
30	900,0	95,12%	4,88%	5,00%	5,00%	
60	1800,0	90,48%	9,52%	10,00%	10,00%	
64	1920,0	89,88%	10,12%	10,67%	10,67%	
120	3600,0	81,87%	18,13%	20,00%	20,00%	
125	3750,0	81,19%	18,81%	20,83%	20,83%	
180	5400,0	74,08%	25,92%	30,00%	30,00%	
240	7200,0	67,03%	32,97%	40,00%	40,00%	
300	9000,0	60,65%	39,35%	50,00%	50,00%	

Punto a partir del cual la aproximación no se acepta como válida

Tabla 5.3.1 Aproximación lineal de la distribución exponencial.

A partir de aquí se usará esta aproximación para el cálculo y estimación de las frecuencias de inspección.

Resumen de variables utilizadas

$MTBF_{fp}$: Tiempo medio entre fallas del equipo o sistema a proteger.

$MTBF_{ds}$: Tiempo medio entre fallas del dispositivo de seguridad (redundante o de protección).

$MTBF_{fs}$: Tiempo medio entre fallas de todo el conjunto (falla simultánea).

t_{ID} : Tiempo entre dos inspecciones detectivas.

La indisponibilidad permitida de la función oculta es:

$$I_{ds} = 1 - D_{ds} \tag{5.3.7}$$

De la ecuación 5.3.3, y teniendo en cuenta las ecuaciones 5.3.1 y 5.3.4, se desprende que la indisponibilidad permitida de la función oculta será:

$$I_{ds} = \left(\frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{fp}}\right) = \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}\right)$$

$$I_{ds} = \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}\right) \tag{5.3.8}$$

El tiempo entre inspección t_{ID} es función de esta probabilidad.

Se mencionó que la frecuencia para una detección de fallos depende, entre otras cosas, del período promedio entre fallas del propio sistema de protección, $MTBF_{ds}$. Si los modos de falla responden a una ley de distribución exponencial, también dependerá de su confiabilidad (C_{ds}). Además, es función de la disponibilidad (D_{ds}); vale decir, del espacio de tiempo porcentual que la función de protección está disponible para utilizarse.

En su forma más general, la indisponibilidad I_{ds} de un equipo en stand-by a consecuencia de la aparición de un fallo oculto y a lo largo de un intervalo regular de tiempo t_{ID}, es[1]:

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} F(t)\, d(t) \tag{5.3.9}$$

Reemplazando F(t) en la integral,

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} (1 - e^{-\lambda_{ds} t})\, d(t)$$

$$I_{ds} = 1 - \frac{(1 - e^{-\lambda_{ds} t_{ID}})}{\lambda_{ds}\, t_{ID}} \tag{5.3.10}$$

La ecuación 5.3.10 representa la indisponibilidad esperada para un dispositivo redundante o de protección, a lo largo del periodo de stand-by. Suele denominarse a λ_{ds} como *tasa de fallas stand-by.*

Por otra parte, recurriendo a la aproximación lineal dada en 5.3.6, y haciendo el reemplazo en 5.3.9, se tiene:

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} \lambda_{ds}\, t\, d(t)$$

---

1 Safety, Reliability and Risk Managemen[1998] Sue Cox and Robin Tait, Apéndice 4 página 325.

Donde resulta

$$I_{ds} = \frac{\lambda_{ds}\, t_{ID}}{2} = \frac{t_{ID}}{2\ MTBF_{ds}} \qquad (5.3.11)$$

La ecuación 5.3.11 pone de manifiesto la relación lineal existente entre la indisponibilidad del dispositivo de seguridad I_{ds}, su confiabilidad expresada a través del periodo promedio entre fallas $MTBF_{ds}$, y el intervalo de inspección detectiva t_{ID}.

Igualando 5.3.8 con 5.3.11 obtenemos el tiempo entre inspecciones detectivas para un único dispositivo de seguridad, y para un periodo constante t_{ID}.

$$t_{ID} = 2\ MTBF_{ds} \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}} \right) \qquad (5.3.12)$$

Veamos ahora el caso de aquellas configuraciones que poseen más de una protección para cumplir el mismo propósito.

Siendo *n* la cantidad de protecciones, la única posibilidad que el conjunto de respaldo o *sistema de seguridad integral* quede fuera de servicio, es cuando los *n* elementos fallan simultáneamente.

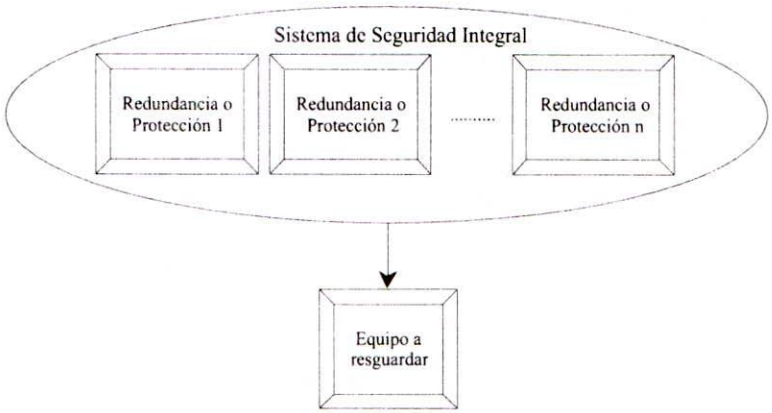


Figura 5.3.5
Un equipo con n respaldos o protecciones.

Los equipos de respaldo 1,....., *n* pueden ser redundancias o protecciones. El sistema de seguridad integral falla cuando fallan los *n* dispositivos.

En este caso recurrimos a la ecuación 1.2.24 del Capítulo 1 para la ley de distribución Binomial o de Bernoulli. Ella establece la probabilidad de que exactamente *x* elementos fallen de un total de *n* solicitados. Para el caso particular en que $x = n$, se tiene:

$$P(n \text{ en } n) = \binom{n}{n} p^n \cdot q^{(n-n)} = p^n$$

Siendo F(t) una función del tiempo, $p^n = (\lambda t)^n$, y sustituyendo la aproximación de 5.3.6 en 5.3.9, se tiene:

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} F(t)^n\, d(t) = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} (\lambda_{ds} t)^n\, d(t)$$

$$I_{ds} = \frac{\lambda_{ds}{}^n\, t_{ID}{}^{(n+1)}}{(n+1)\, t_{ID}} = \frac{\lambda_{ds}{}^n\, t_{ID}{}^n}{(n+1)}$$

$$I_{ds} = \frac{t_{ID}{}^n}{(n+1)\ MTBF_{ds}{}^n} \qquad (5.3.13)$$

Igualando 5.3.13 con 5.3.8, queda:

$$\frac{t_{ID}^{\,n}}{(n+1)\,MTBF_{ds}^{\,n}} = \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}\right)$$

Por lo que el intervalo entre inspecciones detectivas t_{ID} para *n* dispositivos está dado por la ecuación 5.3.14.

$$t_{ID} = MTBF_{ds} \sqrt[n]{(n+1)\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}} \qquad (5.3.14)$$

Es necesario que todos los MTBF sean expresados en la misma unidad, por ejemplo años.

La ecuación 5.3.14 es válida para un sistema con mantenibilidad; es decir, cuando todos los elementos se reparan si son encontrados en estado de falla. Esto significa que al cabo de t_{ID} se prueban la totalidad de los *n* dispositivos iguales y redundantes. En algunos casos esto es posible de manera simultánea para todos los dispositivos.

Si fuese necesario referir 5.3.14 a la tasa de fallas, simplemente haríamos:

$$t_{ID} = \frac{1}{\lambda_{ds}} \sqrt[n]{(n+1)\frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{fp}}} \qquad (5.3.15)$$

Ejemplo 5.3.4

A lo largo de una línea de envasado de bebidas, están dispuestas todas las máquinas que hacen posible el proceso completo. Algunas máquinas, que involucran procesos de riesgo para el personal de operaciones, están aisladas de la circulación normal del personal por medio de paneles enrejados. En total hay 5 de estas máquinas en la línea. El ingreso a cada uno de los recintos es posible únicamente a través de una puerta de acceso. La misma, tiene un switch y un circuito eléctrico asociado, cuya función es interrumpir el funcionamiento de la máquina si se abre la puerta. De igual manera impide el arranque si la puerta está abierta. Vale decir que, la **protección interruptiva** (switch + circuito eléctrico asociado) es capaz de detener su marcha.

Supóngase que luego de haber realizado un análisis probabilístico de riesgo en Planta, se llegó a la conclusión que la compañía esta dispuesta a tolerar el riesgo de que únicamente una persona sufra algún daño grave en 200.000 años para toda la línea.

Aún con la implementación de programas en prevención de accidentes, se sabe que todavía la probabilidad que una persona intente abrir una de las puertas durante la operación normal de la línea o que intente ponerla en marcha con la puerta abierta, es de 1 en 100 años.

Por su parte, los switchs instalados garantizan un $MTBF_{switch}$ de 30 años.

Nota: Como simplificación se asume que la inspección detectiva nunca podría dejar al switch en estado de falla. Vale decir, no existe modo de falla que pueda ocurrir a consecuencia del propio chequeo.

Se pide estimar la frecuencia con la que se tendría que comprobar el funcionamiento del switch para cada una de las puertas, y cuál podría ser una comprobación eficaz de funcionalidad.

Sabiendo que la probabilidad tolerada para la falla simultánea y para toda la línea es de 1 en 200.000, para cada máquina es de 1 en 1.000.000 de años (5 máquinas x 200.000 años), según lo visto en *"Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo"*.

Cabe destacar que, en algunas ocasiones, se afecta a la probabilidad tolerada de accidente (1 en 1.000.000 años) por un factor menor a 1, porque se considera que aún estando la persona dentro del recinto peligroso, no es necesariamente 100% probable que ésta salga dañada.

Si bien esto es cierto, y sabiendo además que se obtendrían de esta forma intervalos de detección de fallos más espaciados, hacemos referencia igualmente a lo mencionado con anterioridad: *"si algo puede salir mal, seguro saldrá mal"*. Por esta razón no conviene realizar tal afectación en este caso.

De 5.3.12 se tiene:

$t_{ID} = 2 \times MTBF_{switch} \times (MTBF_{fp} / MTBF_{fs})$

$t_{ID} = 2 \times 30$ años $\times (100/1.000.000) = 0{,}006$ años = **2,19 días**

$t_{ID} \approx$ **2 días**

Queda claro que el intervalo entre chequeos depende directamente de la confiabilidad del switch, la probabilidad de que una persona intente abrir la puerta aún funcionando la máquina (1 en 100 años) y el riesgo que se tolera para enfrentar un accidente (1 en 1.000.000 años).

Si fuese técnicamente posible, la mejor comprobación para el switch y todo el sistema de protección interruptiva es abrir directamente la puerta durante el funcionamiento de la máquina o bien intentar ponerla en marcha con la puerta abierta, observando que efectivamente ésta última no arranque. Ello permitiría comprobar si se encuentran operativos tanto el switch como el resto de los componentes.

Ejemplo 5.3.5

Sea el caso anterior, sólo que ahora por cuestiones de seguridad y dado que el intervalo detectivo es muy bajo, se instalaron en cada puerta dos switchs. Cada uno de ellos cuenta con un circuito independiente capaz de detener la marcha de la máquina o impedir su arranque. Siendo que al abrir la puerta se inspeccionan simultáneamente los dos switchs, calcular t_{ID}.

Con 5.3.14 se tiene:

$t_{ID} = MTBF_{switch} \times [(n+1) \times MTBF_{fp} / MTBF_{fs}]^{1/n}$

En este caso n=2

$t_{ID} = 30$ años $\times [(2+1) \times (100/1.000.000)]^{1/2} = 0{,}519$ años = 189,6 días = **6,32 meses**

$t_{ID} \approx$ **6 meses**

Evidentemente la instalación de otro switch, ha logrado mejorar sustancialmente el intervalo de inspección detectivo t_{ID}.

Nótese sin embargo, que en ninguno de los dos ejemplos anteriores se tuvieron en cuenta los modos de falla que pueden acontecer sobre el circuito de protección interruptivo (cables, conexiones, etc). Solamente se consideró el periodo promedio entre falla de los switchs.

Ejemplo 5.3.6

Sea el caso del ejemplo anterior (dos circuitos independientes de seguridad) sabiendo que existe un modo de falla dominante para cada circuito que acompañan a los switch, cuyo MTBF es de 50 años.

Antes de aplicar la fórmula 5.3.14, es necesario calcular el $MTBF_{ds}$ de todo el dispositivo de protección para cada circuito (switch + circuito eléctrico).

Según la ecuación 5.3.5

$1/MTBF_{ds} = 1/MTBF_{switch} + 1/MTBF_{circuito}$

$1/MTBF_{ds} = 1/30$ años $+ 1/50$ años = **18,75 años**

Utilizando ahora 5.3.14

t_{ID} = 18,75 años x $[(2+1) \times (100/1.000.000)]^{1/2}$ = 0,325 años = **118,54 días**

$t_{ID} \approx$ **4 meses**

Ejemplo 5.3.7[1]

Un complejo de entretenimientos posee cinco salas de cine, cuatro pasillos y un patio central. En cada uno de los diez sitios hay un detector de humo Dh, como se ilustra en la figura 5.3.6. Todo el sistema de alarma se compone de un conjunto de diez detectores de humo **Dh**, dos alarmas **Am** ubicadas en los extremos opuestos del edificio y una central de procesamiento **Uc** encargada de activar las dos alarmas cuando alguno de los detectores envía una señal.

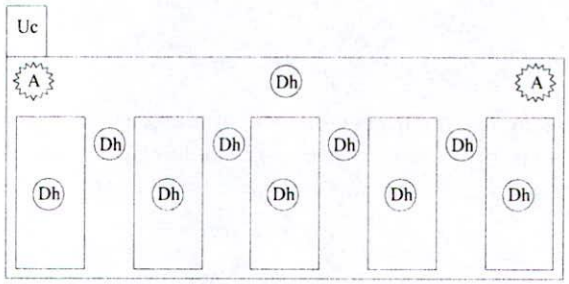


Figura 5.3.6 Distribución de componentes en el edificio.

Para este tipo de siniestros es común aceptar para todo el edificio una probabilidad de incendio grave debido a un fallo del sistema de alarmas de sólo 1 en 1.000.000 de años. Dada las características del edificio, se pudo comprobar que si una de las alarmas falla, es posible oír la otra desde cualquier parte del edificio. Cada una tiene, según indica el fabricante, un $MTBF_{Am}$ = 75 años. Sin embargo, si la unidad de control Uc se encuentra averiada deja fuera de servicio a todo el sistema. El fabricante de la central asegura que el $MTBF_{Uc}$ es de 600 años.

La Uc puede chequearse estimulando cualquiera de los detectores directamente con humo. La estadística de incendios de la ciudad indica que hay 100 edificios similares y que se registran, en promedio, 2 incidentes por año que podrían provocar un incendio de estas características, si los sistemas de alarma no funcionasen adecuadamente. Con estos datos, entonces, es posible ver que ocurriría un incidente de estas características en el edificio una vez cada 50 años. Vale decir que el periodo promedio entre fallos (tasa de falla) de la función a proteger es $MTBF_{fp}$ = 50 años. Por su parte, tablas especializadas indican que el $MTBF_{Dh}$ = 2.500 años. Se pide determinar cuál es el intervalo de tiempo entre inspecciones detectivas para todos los componentes del sistema.

Asumiendo que la probabilidad tolerada para el fallo simultáneo en todo el complejo es de 1 en 1.000.000 de años, es posible aproximar la probabilidad de fallo simultáneo tolerado para cada uno de los tres grupos de componentes (detectores, alarmas y unidad de control), tomando un tercio para cada uno, es decir 1 en 3.000.000 de años. Esto hace un $MTBF_{fs}$ = 3.000.000 años para cada parte del sistema de alarma.

1) Unidad de Control ***Uc***

Para calcular el t_{ID} utilizamos la ecuación 5.3.14

$t_{ID\,(Uc)} = MTBF_{Uc} \times [(n+1) \times MTBF_{fp} / MTBF_{fs}]^{1/n}$

$t_{ID\,(Uc)}$ = 600 años x $[(1+1) \times 50$ años / 3.000.000 años$]^{1/1}$

$t_{ID\,(Uc)}$ = 7,3 días $\approx$ **1 semana**

---

1 Este ejemplo está basado en la idea propuesta por Aladon Ltd. en la sección RCM 11/I 3ª edición 1999 "INTERVALO DE LA TAREA DE BÚSQUEDA DE FALLOS" página 10.

2) Detectores de humo **Dh**

Para los detectores de huno (Dh_i) el caso es distinto pues debemos considerar la probabilidad de fallo simultáneo para cada una de las zonas de influencia de los detectores. Además, un incendio en cualquier sector del piso podría causar un incendio grave en todo el edificio.

Según lo analizado en la sección 5.2.3 *"Evaluaciónes Probabilísticas de Riesgo"*, al conjunto de detectores de humo lo debemos subdividir en 10 elementos. Esto arroja una probabilidad tolerada de falla simultánea para cada sub-elemento (Dh_i) de 1 en 30.000.000 de años (10 x 3.000.000). A su vez, si la probabilidad de incendio en todo el lugar es 1 en 50, la probabilidad de incendio en cualquier sector es 1 en 500 años. Siendo que el $MTBF_{Dh}$ = 2.500 años, entonces:

$$t_{ID\,(Dh)} = MTBF_{Dh} \times [(n+1) \times MTBF_{fp} / MTBF_{fs}]^{1/n}$$

$$t_{ID\,(Dh)} = 2.500 \text{ años} \times [(1+1) \times 500 \text{ años} / 30.000.000 \text{ años}]^{1/1}$$

$$t_{ID\,(Dh)} = 30{,}42 \text{ días} \approx \mathbf{1\ mes}$$

Esta relación entre la frecuencia de inspección de la unidad de control (semanal) y los detectores de humo (1 mes), obliga a probar individualmente entre 2 y 3 detectores cada vez que se verifica la central Uc. La vuelta completa haría que cada detector se probara más de una vez por mes.

3) Alarmas **Am**

Siendo que cada una de las alarmas puede oírse desde cualquier parte del edificio, las dos deberían estar falladas para no advertir la presencia de fuego. Lo que significa que en este caso n=2.

$$t_{ID\,(Am)} = MTBF_{(Am)} \times [(n+1) \times MTBF_{fp} / MTBF_{fs}]^{1/n}$$

$$t_{ID\,(Am)} = 75 \text{ años} \times [(2+1) \times 50 \text{ años} / 3.000.000 \text{ años}]^{1/2}$$

$$t_{ID\,(A)} = 193{,}57 \text{ días} \approx \mathbf{6\ meses}$$

Ejemplo 5.3.8

Un hospital posee un grupo de generación eléctrica auxiliar cuyo fin es garantizar que ciertos equipos vitales para los pacientes, no se detengan. Este puede ser el caso del equipamiento necesario durante una cirugía ó equipos auxiliares para camas de terapia intensiva. El sistema auxiliar es capaz de entregar la potencia suficiente para esas funciones. La empresa distribuidora de energía eléctrica protege a las zonas en las que hay hospitales con circuitos o lazos duplicados de alimentación, de forma tal que es bastante poco probable que se corte el suministro eléctrico si se lo compara con el resto del tendido eléctrico. De todas maneras la compañía de distribución reconoce que, de los 12 hospitales ubicados en la ciudad, han interrumpido el suministro una vez en los últimos 10 años. El personal de mantenimiento del hospital efectúa todos los trabajos de mantenimiento preventivo que son necesarios sobre el grupo auxiliar. Aún así, se piensa que es recomendable realizar tareas de detección de fallos debido a que existen modos de falla no alcanzados por el mantenimiento preventivo. Estos fallos son completamente aleatorios, pudiendo en el peor de los casos, impedir el arranque del sistema.

Fue posible consultar a 22 usuarios de estos mismos generadores, en diferentes rubros industriales, advirtiendo que en una oportunidad uno de ellos no arrancó en forma automática cuando una emergencia lo requirió. Estos datos corresponden a los últimos 10 años. Se asume que todos los equipos contaban con el plan de mantenimiento preventivo obligatorio. Las autoridades del hospital están dispuestas a aceptar una probabilidad de 1 en 100.000 de que en cualquier año alguien resulte seriamente perjudicado por la falta de energía eléctrica en el hospital.

Se pide determinar cuál es el intervalo de detección de fallos para el grupo electrógeno, dado el contexto operativo mencionado.

La falla simultánea se presentará cuando exista un corte de suministro eléctrico y, además, el sistema de generación auxiliar no pueda entrar en funcionamiento. Alguien podría pensar que aunque esta falla simultánea se produzca, todavía existe alguna posibilidad de que nadie necesite en forma vital algún equipamiento para salvaguardar su vida. Sin embargo, esto último no se tiene en cuenta, pues se asume la postura conservadora de que siempre habrá pacientes que requieran de energía eléctrica para su supervivencia.

Dicho esto, el $MTBF_{fp}$ = (12 x 10 años) = 120 años

$MTBF_{fs}$ = 100.000 años, y

$MTBF_{ds}$ = (22 x 10 años) / 1 fallo = 220 años

Utilizando la ecuación 5.3.14 con $n = 1$

$t_{ID\,(Ge)}$ = 220 años x [(1+1) x 120 años / 100.000 años]$^{1/1}$

$t_{ID\,(Ge)}$ = 192,72 días ≈ **6 meses**

Si el mismo grupo de generación auxiliar se encontrase ubicado en una zona cuyo $MTBF_{fp}$ es sólo de 30 años, calcular el nuevo valor de t_{ID}.

$t_{ID\,(Ge)}$ = 220 años x [(1+1) x 30 años / 100.000 años]$^{1/1}$

$t_{ID\,(Ge)}$ = 48,18 días ≈ **1,5 meses**

Nótese cuán sensible es el t_{ID} a la tasa de fallas de la función a resguardar; para este caso, la probabilidad de un corte de suministro eléctrico por parte de la distribuidora.

Algunas protecciones indicativas o interruptivas, con la finalidad de reducir falsas señales, se diseñan de forma tal que más de una de ellas deba actuar para disparar la señal. Todos los sensores instalados miden la misma variable y en el mismo punto, y cualquier par puede actuar activando el sistema de seguridad. Vale decir que el sistema aún podría funcionar con cierto número de dispositivos averiados.

Si n es el número total de unidades en paralelo y j el de unidades necesarias para activar el sistema, se llama x al número de unidades que deberían fallar para que todo el conjunto de detección falle. Esto es,

$$x = n + 1 - j \tag{5.3.16}$$

Haciendo uso nuevamente de la ecuación 1.2.24 del Capítulo1, la probabilidad de que fallen exactamente x componentes de un total de n en funcionamiento es:

$$P(x\ en\ n) = \binom{n}{x} p^x \cdot q^{(n-x)}$$

Donde p es directamente λ_{ds}. t y $P(x\ en\ n)$ es la probabilidad de que exactamente x elementos fallen de los n instalados.

Si λ_{ds} t es << 1, el factor $q^{(n-x)} \approx 1$, por lo que reemplazando $P(x\ en\ n)$ en la ecuación 5.3.9, se tiene:

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} \binom{n}{x} (\lambda_{ds} t)^x \, d(t)$$

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \binom{n}{x} \lambda_{ds}^{\ x} \int_0^{t_{ID}} t^x \, d(t)$$

$$I_{ds} = \frac{n!}{x!\,(n-x)!} \lambda_{ds}^{\ x} \frac{1}{t_{ID}} \frac{t_{ID}^{(x+1)}}{(x+1)} = \frac{n!}{x!\,(n-x)!} \frac{1}{MTBF_{ds}^{\ x}} \frac{t_{ID}^{\ x}}{(x+1)} \qquad (5.3.17)$$

Igualando 5.3.17 con 5.3.8

$$\frac{n!}{x!\,(n-x)!} \frac{1}{MTBF_{ds}^{\ x}} \frac{t_{ID}^{\ x}}{(x+1)} = \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}\right)$$

Por lo que el intervalo entre inspecciones detectivas t_{ID} queda expresado por:

$$t_{ID} = MTBF_{ds} \sqrt[x]{\frac{x!\,(n-x)!}{n!} (x+1) \frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}} \qquad (5.3.18)$$

Nótese que sólo se considera la probabilidad de que fallen exactamente los *x* elementos. En rigor, esta condición de falla también se da cuando fallan los *x+1* hasta *n*. Se podría utilizar también la ecuación 1.2.27 del Capítulo 1.

Ejemplo 5.3.9

El sistema de refrigeración de un reactor químico es el encargado de evitar que la temperatura del producto en su interior exceda de cierto valor riesgoso. El recipiente está presurizado y un exceso de temperatura provoca un aumento de presión cuyas consecuencias pueden ser catastróficas para la seguridad de las personas. El intercambio de calor entre el reactor y el medio se logra haciendo circular agua por el interior de cámaras dispuestas externamente. En condiciones normales, el caudal de agua del circuito primario es suficiente para extraer el calor que se genera en el proceso. Pero pueden existir situaciones (muy poco frecuentes) en que la temperatura aumente y supere los valores establecidos como normales.

Existen protecciones **indicativas** (alarmas) que ponen en conocimiento a los operarios cuando se produce un aumento de temperatura fuera de lo normal. Sin embargo, y dado que el proceso exotérmico es muy acelerado, por encima de cierto valor aún superior al de las alarmas, existe otra protección **contensiva** constituida por un circuito secundario y auxiliar de bombeo capaz de aumentar el caudal de refrigeración. Este sistema de bombeo auxiliar es gobernado por tres sensores independientes, sus circuitos eléctricos y una unidad central de proceso (U_p) que monitorean permanentemente la temperatura del producto dentro del reactor y encienden la bomba auxiliar de ser necesario. Los tres sensores se encuentran instalados en puntos estratégicamente distribuidos dentro del reactor y están calibrados a la misma temperatura. Para evitar señales incorrectas, la lógica de la unidad de control se activa únicamente cuando dos de los tres sensores envían la señal de alta temperatura a la unidad de control.

El historial de proceso indica que en los últimos 15 años, desde que se instaló el reactor, el sistema auxiliar de bombeo debió arrancar en dos oportunidades.

La falla simultánea (exceso de temperatura + circuito auxiliar de agua averiado) puede tener consecuencias muy graves y sólo se tolera una probabilidad de falla de 1 en 200.000 años. Según averiguaciones y datos del proveedor, se sabe que el MTBF de los sensores de temperatura es de 150 años. Por su parte, se asume para la U_p un $MTBF_{Up}$ = 3.000 años. Se estima apropiado un MTBF para las conexiones eléctricas de 100 años.

Se solicita determinar cuál debe ser la frecuencia de inspección detectiva para los circuitos de control de temperatura y para la unidad central de proceso U_p.

Siendo que existen tres circuitos sensores de temperatura (n=3 y j=2), aplicando la ecuación 5.3.16, se tiene:

$$x = n + 1 - j = 3 + 1 - 2$$

Por lo tanto $x = 2$

Antes de utilizar 5.3.18, debemos calcular el MTBF del conjunto "sensor + circuito eléctrico" y el período promedio entre fallos de la función protegida ($MTBF_{fp}$).

$$1/ MTBF_{(sensores + circuito)} = 1/ MTBF_{(Sensores)} + 1 / MTBF_{(Circuito)} =$$

$$1/ MTBF_{(sensores + circuito)} = 1/ 150 \text{ años} + 1 / 100 \text{ años} =$$

$$MTBF_{(sensores + circuito)} \approx \mathbf{60 \text{ años}}$$

A su vez,

$$MTBF_{fp} = 15 \text{ años} / 2 \text{ fallos} = \mathbf{7{,}5 \text{ años}}$$

La ecuación 5.3.18 queda planteada de la siguiente manera:

$$t_{ID(sensores + circuito)} = MTBF_{(sensores + circuito)} . [((n-x)! x! / n!) . (x + 1)) . MTBF_{fp} / MTBF_{fs}]^{1/x} =$$

$$t_{ID(sensores + circuito)} = 60 \text{ años}. [((3-2)! 2! / 3!) . (2 + 1)) . 7{,}5 \text{ años} / MTBF_{fs}]^{1/2} =$$

El sistema de control puede encontrarse fuera de servicio tanto por los conjuntos "sensor + circuito" como por la U_p. Siendo que se tolera 1 en 200.000 años para una consecuencia muy grave, entonces 1 en 400.000 años es la probabilidad de falla simultánea tolerada para cada uno de los ellos.

Finalmente, para cada "sensor + circuito" se tiene:

$$t_{ID(sensores + circuito)} = 60 \text{ años} . [((1 \times 2 / 6) . (2 + 1)) . 7{,}5 \text{ años} / 400.000]^{1/2} =$$

$$t_{ID (sensores + circuito)} = 94{,}83 \text{ días} \approx \mathbf{3 \text{ meses}}$$

Cada tres meses se deberá verificar el funcionamiento de los tres sensores, simulando un estado de falla para cada uno y verificando que los otros dos envíen las señales de sobre temperatura a la unidad de control.

Para la unidad central de proceso se aplica directamente la ecuación 5.3.14, con n=1

$$t_{ID (Up)} = MTBF_{Up} \times [(n+1) \times MTBF_{fp} / MTBF_{fs}]^{1/n} =$$

$$t_{ID (Up)} = 3.000 \text{ años} \times [(1+1) \times 7{,}5 \text{ años} / 400.000]^{1/1}$$

$$t_{ID (Up)} = 41{,}06 \text{ días} \approx \mathbf{1 \text{ mes}}$$

En el inicio de la sección 5.3 se mencionó la importancia de asegurar, durante la ejecución de las intervenciones detectivas, que una vez finalizada la misma el elemento haya quedado operativo. Esto obliga a pensar que pueden existir situaciones en las que la propia inspección cause el fallo del elemento. Hay situaciones en las que el componente bajo detectivo se sobrecarga o sufre una avería por error humano, pudiendo quedar fuera de servicio.

En cualquier caso debe estimarse q (probabilidad condicional constante de que ocurra cualquiera de estas dos situaciones) y afectar el cálculo de t_{ID} en función de ella. Vale decir que, la probabilidad q de que el elemento falle en cada solicitación se asume independiente de las solicitaciones previas.

Como ocurre con cualquier otro componente, si falla el dispositivo de respaldo es a través de sus modos de falla. Algunos modos se producen, como ya se mencionó, durante el periodo de stand-by. Otros podrán ocurrir como consecuencia de la **rutina de inspección detectiva**.

La Indisponibilidad total ($I_{ds\ Total}$) del componente será la suma de la indisponibilidad causada por los modos de falla durante el periodo de "stand-by" (golpes, desajustes, errores durante la instalación, ataques del medio ambiente, etc.), más aquellos producidos por el propio chequeo.

$$I_{ds\ Total} = I_{ds\ Stand\text{-}by}(1 - q) + q \tag{5.3.19}$$

Vemos en 5.3.19 que la probabilidad de fallo por chequeo (q) afecta incluso a la indisponibilidad que se produce únicamente por los modos de falla propios del periodo de stand-by. Esto se debe a que $I_{ds\ Stand\text{-}by}$ sólo aportará a $I_{ds\ Total}$ proporcionalmente a las veces que no lo hace q. Cuanto menor sea q mayor será la componente de indisponibilidad por stand-by que tenga el componente en su totalidad. Cuando $q = 0$ la indisponibilidad es directamente la expresada por la ecuación 5.3.12.

$$I_{ds\ Total} = \frac{t_{ID}}{2\ MTBF_{ds_{Stand\text{-}by}}}(1 - q) + q$$

$$\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}} = \frac{t_{ID}}{2\ MTBF_{ds_{Stand\text{-}by}}}(1 - q) + q$$

Donde despejando t_{ID} se obtiene:

$$t_{ID} = \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}} - q\right)\ \frac{2\ MTBF_{ds_{Stand\text{-}by}}}{(1 - q)} \tag{5.3.20}$$

Es muy importante destacar que en la ecuación 5.3.20 el $MTBF_{ds\ Stand\text{-}by}$ no contempla los modos de falla causados por la inspección. Vale decir, únicamente tiene en cuenta aquellos que se originan entre dos intervenciones, es decir, durante el periodo llamado de stand-by.

Es posible llegar la expresión 5.3.20, sustituyendo la función $\mathbf{F(t) = \lambda t(1 - q) + q}$ en 5.3.9.

Si la situación se presentara con n dispositivos redundantes, sería necesario resolver la integral 5.3.9 con la función $F(t) = [\lambda t\ .\ (1 - q) + q]^n$, igualar a I_{ds} y despejar t_{ID}.

Para el caso en que el único modo de falla capaz de inactivar el dispositivo de protección es la propia prueba de inspección funcional, entonces la ecuación 5.3.9 es sencillamente:

$$I_{ds} = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} F(t)\ d(t) = \frac{1}{t_{ID}} \int_0^{t_{ID}} q\ d(t) = q$$

Por lo que,

$$MTBF_{fs} = \frac{MTBF_{fp}}{q} \tag{5.3.21}$$

La probabilidad de falla q por accionar el dispositivo es función directa del número promedio de ciclos entre fallos del dispositivo protector[1].

De acuerdo a esto, no siempre será útil un chequeo funcional para estos casos, pues si bien permite saber si la última prueba del dispositivo produjo la falla, lo volverá a sobrecargar y aumentará la posibilidad de que falle como resultado de la última prueba.

5.3.3 Cuando la Falla Simultánea únicamente tiene impacto económico

Si el fallo simultáneo no tiene consecuencias para la seguridad de las personas o el medio ambiente, el riesgo se estima únicamente en función de las consecuencias económicas.

Así, es posible encontrar un equilibrio entre lo que constará afrontar la falla simultánea a lo largo de un horizonte de validez definido (generalmente anual), y el costo de realizar la tarea de búsqueda de fallos más el costo de reparar los dispositivos si fuesen encontrados en un estado de no disponibilidad, ambos también a lo largo de un año.

Las siguientes son las variables a tener en cuenta en esta parte.

C_{fs} : Costo como consecuencia de una falla simultánea.
$C_{Anual\text{-}fs}$: Costo anual estimado para las fallas simultáneas.
C_{ID} : Costo por cada intervención detectiva.
$C_{Anual\text{-}ID}$: Costo anual estimado de las intervenciones detectivas.
C_{ds} : Costo por cada reparación del dispositivo de seguridad (redundante o de protección), si fue encontrando en estado de falla.
$C_{Anual\text{-}ds}$: Costo anual estimado por las reparaciones del dispositivo de seguridad (redundante o de protección).
C_{fp} : Costo por reparar el equipo o sistema a proteger cuando sufre una falla funcional.
$C_{Anual\text{-}fp}$: Costo anual estimado por las reparaciones del equipo o sistema a proteger.
C_{Total} : Costo total anual.
$MTBF_{ds}$: Tiempo medio entre fallas del dispositivo de seguridad (redundante o de protección).
$MTBF_{fp}$: Tiempo medio entre fallas del equipo, sistema o función a proteger.
P_{ds} : Probabilidad de falla del dispositivo de seguridad (redundante o de protección).
t_{ID} : Tiempo entre dos inspecciones detectivas (en años).

El resto de las variables ya fueron enunciadas anteriormente.

Combinando las ecuaciones 5.3.8 y 5.3.11 se tiene que la probabilidad de falla simultánea puede expresarse a través de:

$$P_{fs} = \frac{1}{MTBF_{fs}} = \frac{t_{ID}}{2\, MTBF_{ds}\, MTBF_{fp}}$$

El costo a lo largo de un año para la falla simultánea ($C_{Anual\text{-}fs}$) será el producto entre C_{fs} y P_{fs}, éste último medido en años.

$$C_{Anual\text{-}fs} = \frac{C_{fs}\, t_{ID}}{2\, MTBF_{ds}\, MTBF_{fp}} \qquad (5.3.22)$$

A su vez, el costo de realizar la intervención detectiva a lo largo de un año se puede estimar como:

$$C_{Anual\text{-}ID} = \frac{C_{ID}}{t_{ID}} \qquad (5.3.23)$$

siempre considerando a t_{ID} en años.

---

1 Consultar RCMII Reliability Centred Maintenance de John Moubray[2004] donde se presenta un exhaustivo análisis de esta situación particular, página 185.

De la misma forma, el costo anualizado por reparar el dispositivo de seguridad será:

$$C_{Anual\text{-}ds} = \frac{C_{ds}}{MTBF_{ds}} \tag{5.3.24}$$

Y el costo a lo largo de un año por el hecho de reparar el equipo a proteger es:

$$C_{Anual\text{-}fp} = \frac{C_{fp}}{MTBF_{fp}} \tag{5.3.25}$$

Finalmente el costo total C_{Total} será la suma de los cuatro factores anteriores.

$$C_{Total} = C_{Anual\text{-}fs} + C_{Anual\text{-}ID} + C_{Anual\text{-}ds} + C_{Anual\text{-}fp}$$

Reemplazando:

$$C_{Total} = \frac{C_{fs}\, t_{ID}}{2\, MTBF_{ds}\, MTBF_{fp}} + \frac{C_{ID}}{t_{ID}} + \frac{C_{ds}}{MTBF_{ds}} + \frac{C_{fp}}{MTBF_{fp}}$$

Para obtener el costo total mínimo se hace $dC_{Total} / dt_{ID} = 0$

$$\frac{dC_{Total}}{dt_{ID}} = \frac{C_{fs}}{2\, MTBF_{ds}\, MTBF_{fp}} - \frac{C_{ID}}{t_{ID}^2} = 0$$

Por tanto, el intervalo entre inspecciones detectivas para un único dispositivo de seguridad, es:

$$t_{ID} = \left(\frac{2\, MTBF_{ds}\, MTBF_{fp}\, C_{ID}}{C_{fs}}\right)^{1/2} \tag{5.3.26}$$

Cuando se encuentran instalados *n* dispositivos redundante o de protección, con el fin de proteger a una misma función, la situación es similar sólo que $n > 1$. Partiendo, entonces, de la ecuación 5.3.13 y teniendo en cuenta 5.3.8, la probabilidad de falla simultánea es:

$$P_{fs} = \frac{1}{MTBF_{fs}} = \frac{1}{(n+1)\, MTBF_{fp}} \left(\frac{t_{ID}}{MTBF_{ds}}\right)^n \tag{5.3.27}$$

Reemplazando se obtiene el costo total como:

$$C_{Total} = \frac{C_{fs}}{(n+1)\, MTBF_{fp}} \left(\frac{t_{ID}}{MTBF_{ds}}\right)^n + \frac{C_{ID}}{t_{ID}} + \frac{C_{ds}}{MTBF_{ds}} + \frac{C_{fp}}{MTBF_{fp}}$$

Planteando de la misma manera $dC_{Total} / dt_{ID} = 0$ para obtener el costo total mínimo, queda:

$$\frac{dC_{Total}}{dt_{ID}} = \frac{n\, C_{fs}\, t_{ID}^{(n-1)}}{(n+1)\, MTBF_{fp}\, MTBF_{ds}^n} - \frac{C_{ID}}{t_{ID}^2} = 0$$

Resultando el intervalo entre inspecciones detectivas t_{ID} para *n* dispositivos.

$$t_{ID} = \left(\frac{(n+1)\, MTBF_{ds}^n\, MTBF_{fp}\, C_{ID}}{n\, C_{fs}}\right)^{1/n+1} \tag{5.3.28}$$

Ejemplo 5.3.11

Una red de despacho de gas para consumo vehicular tiene instalado un compresor en cada una de sus siete estaciones. El sistema de lubricación de cada compresor cuenta, como último sistema de seguridad, con una **protección interruptiva** capaz de detenerlo cuando la presión de aceite es inferior a un valor límite. El circuito posee, por seguridad, dos sensores dispuestos en paralelo y estratégicamente ubicados. La señal de uno de ellos es suficiente para sacarlo de funcionamiento.

Si ambos sensores fallan, el compresor podría resultar seriamente dañado y el costo posible de su reparación se estima en $ 171.700. Las pérdidas de beneficio que conlleva la rotura del compresor le significan a la compañía $ 18.050 por los diez días que demoraría su reparación. Se encuentran instalados 7 compresores similares en la red y los representantes técnicos de cada estación reportaron que durante los últimos 12 años en tres ocasiones se detuvieron los compresores por baja presión de aceite de lubricación. Por su parte, los proveedores de los sensores opinan que es seguro estimar un $MTBF_{sensor}$ = 40 años para cada uno.

Calcular la frecuencia más adecuada para la detección de fallos sobre los sensores. Se asume que es posible simular una baja presión en el sistema para la prueba de ambos sensores por separado y que su costo (con parada programada incluida) asciende en total a $ 200.

La falla simultánea tiene un costo total de $ 171.700 + $ 18.050; vale decir que:

C_{fs} = $ 189.750.

C_{ID} = $ 200

$MTBF_{fp}$ = 12 años x 7 compresores / 3 fallos = 28 años

Aplicando la ecuación 5.3.28 cuando $n = 2$, se tiene:

$$t_{ID} = \{[(2 + 1) \times 40^2 \times 28 \times 200] / [2 \times 189.750]\}^{1/(2+1)}$$

$$t_{ID} = \{[(3) \times 40^2 \times 28 \times 200] / [2 \times 189.750]\}^{1/3}$$

t_{ID} = 4,14 años ≈ **4 años**

Ejemplo 5.3.12

En el ejemplo anterior no se tuvieron en cuenta los modos de falla aportados por las otras partes del circuito de seguridad (cables, conexiones, unidad de control, etc). Cada sensor de presión tiene un circuito independiente con un $MTBF_{circuito}$ estimado de 15 años. Por su parte, la unidad lógica de control (única para los dos circuitos) tiene, según el fabricante, un $MTBF_{Uc}$ = 250 años. Estimar bajo estas nuevas condiciones el nuevo t_{ID}.

Debemos calcular en primer lugar el $MTBF_{ds}$ combinado para los dos modos de falla, el sensor "+" el resto del circuito.

$$1/ MTBF_{(sensor + circuito)} = 1/ MTBF_{(sensor)} + 1 / MTBF_{(circuito)} =$$

$$1/ MTBF_{(sensor + circuito)} = 1/ 40 \text{ años} + 1 / 15 \text{ años} =$$

$MTBF_{(sensor + circuito)}$ = 10,9 años ≈ **10 años**

C_{fs} = $ 189.750

Por lo tanto, para los conjuntos "sensor y circuitos":

$$t_{ID(sensor + circuito)} = \{[(2 + 1) \times 10^2 \times 28 \times 200] / [2 \times 189.750]\}^{1/(2+1)}$$

$$t_{ID(sensor + circuito)} = \{[(3) \times 10^2 \times 28 \times 200] / [2 \times 189.750]\}^{1/3}$$

$t_{ID(sensor + circuito)}$ = 1,64 años ≈ **1,5 año**

Para la unidad de control $n = 1$

$$t_{ID(Uc)} = \{[(1 + 1) \times 250^2 \times 28 \times 200] / [1 \times 189.750]\}^{1/(1+1)}$$

$$t_{ID(Uc)} = \{[(2) \times 250^2 \times 28 \times 200] / [1 \times 189.750]\}^{1/2}$$

$t_{ID(Uc)} = 60{,}74$ años $\approx$ **60 años**

Este intervalo es demasiado extenso para ser representativo y técnicamente útil, de todas maneras la unidad de control es controlada cada vez que se verifica la funcionalidad de los conjuntos "sensor + circuito".

Para aquellos fallos que tienen consecuencias para la seguridad de las personas o el medio ambiente, se desarrolló la ecuación 5.3.18. De forma análoga, es posible obtener una ecuación similar cuando las consecuencias de los fallos son solamente económicas.

Recordar que para reducir falsas señales, n es el número total de unidades en paralelo y j el número de unidades necesarias para activar el sistema.

$$x = n + 1 - j$$

De 5.3.17 y con 5.3.8, se tiene:

$$P_{fs} = \frac{1}{MTBF_{fs}} = \frac{1}{MTBF_{fp}} \frac{n!}{(x + 1)\, x!\, (n - x)!} \left(\frac{t_{ID}}{MTBF_{ds}}\right)^x$$

Haciendo:

$$r = \frac{n!}{(x + 1)\, x!\, (n - x)!} \tag{5.3.29}$$

y remplazando, se obtiene el costo total.

$$C_{Total} = \frac{r\, C_{fs}}{MTBF_{fp}} \left(\frac{t_{ID}}{MTBF_{ds}}\right)^x + \frac{C_{ID}}{t_{ID}} + \frac{C_{ds}}{MTBF_{ds}} + \frac{C_{fp}}{MTBF_{fp}}$$

Igualando a cero la dC_{Total} / dt_{ID}, obtenemos el costo total mínimo.

$$\frac{dC_{Total}}{dt_{ID}} = \frac{r\, C_{fs} \times t_{ID}^{(x-1)}}{MTBF_{fp}\, MTBF_{ds}^{\,x}} - \frac{C_{ID}}{t_{ID}^2} = 0$$

Así, el intervalo t_{ID} cuando son necesarios para activar el sistema j de n elementos, resulta:

$$t_{ID} = \left(\frac{MTBF_{fp}\, MTBF_{ds}^{\,x}\, C_{ID}}{x\, r\, C_{fs}}\right)^{1/x+1} \tag{5.3.30}$$

Ejemplo 5.3.13

Sea el mismo ejemplo de la red de despacho de gas para consumo vehicular (5.3.11), sólo que ahora la lógica del sistema cuenta con tres sensores de seguridad. Para evitar detenciones innecesarias, se requiere la señal de dos de ellos para detener el compresor.

Calcular la frecuencia más adecuada para este nuevo contexto operativo.

$C_{fs} = \$\ 189.750.$

$C_{ID} = \$\ 200$

$MTBF_{fp} = 12$ años x 7 compresores / 3 fallos = 28 años

Siendo que existen tres sensores de presión de aceite (n=3) y dos de ellos deben actuar para evitar falsas señales (j=2), entonces:

$x = n + 1 - j = 3 + 1 - 2$

Por lo tanto $x = \mathbf{2}$

Aplicando 5.3.29

$r = \mathbf{1}$

Reemplazando en 5.3.30

$t_{ID} = \{(28 \times 40^2 \times 200) / [2 \times 1 \times 189.750]\}^{1/(2+1)}$

$t_{ID} = \{(28 \times 40^2 \times 200) / [2 \times 1 \times 189.750]\}^{1/3}$

$t_{ID} = 2{,}87$ años $\approx$ **2,5 años**

Puede apreciarse la disminución del t_{ID} para el caso en que habiendo tres sensores idénticos, es necesario que dos funcionen correctamente para activar el sistema completo. Recordar que en el ejemplo 5.3.11 el t_{ID} fue estimado en **4 años**.

Ejemplo 5.3.14

Una máquina sopladora de botellas plásticas alimenta en forma directa a una línea envasadora de bebidas. Esto obliga a mantener en funcionamiento a la sopladora permanentemente con el fin de no detener toda la línea. A su vez, la sopladora usa aire comprimido para el proceso de soplado, el que es provisto por un compresor a tornillo. La sopladora deja de funcionar si el compresor se detiene, por lo que se encuentra instalado otro compresor igual como redundancia pasiva del primero. Un sistema de control es el encargado de conmutar el arranque entre los compresores.

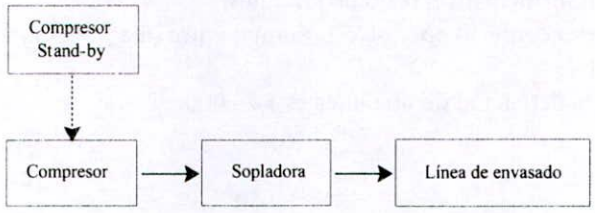


Figura 5.3.7
Línea de envasado con compresor en stand-by.

Una falla simultánea ocurrida entre los dos compresores le ocasiona a la compañía un perjuicio económico por pérdidas de producción de $ 18.500 por hora aproximadamente. El tiempo de diagnóstico y reparación de cualquiera de los compresores dependerá del tipo de avería, pero se sabe que nunca demora menos de 4 horas.

Hay funcionando en Planta un total de 6 compresores y desde hace 8 años hubo dos veces que se detuvieron en forma repentina. Si bien al compresor que se encuentra en stand-by se le realizan todas las tareas de mantenimiento preventivo, algunos modos de falla pueden ocurrir de todas maneras en forma aleatoria, sobre todo aquellos que tienen que ver con el sistema de arranque. Para estos últimos se estima un periodo promedio entre fallas de 12 años. Realizar el chequeo de inspección es una tarea muy sencilla que puede realizar un mecánico del taller central y le representa a la empresa un costo estimado en $ 55.

Calcular la frecuencia de inspección detectiva para verificar los modos de falla aleatorios que pueden manifestarse en el compresor redundante.

La falla simultánea tiene un costo total de $ 18.500 x 4 horas, es decir que:

C_{fs} = $ 74.000

C_{ID} = $ 55

$MTBF_{fp}$ = 8 años x 6 compresores / 2 fallos = 24 años

Aplicando la ecuación 5.3.28 cuando n = 1, se tiene:

$t_{ID} = \{[(1 + 1) \times 12^{1} \times 24 \times 55] / [1 \times 74.000]\}^{1/(1+1)}$

$t_{ID} = \{[(2) \times 12^{1} \times 24 \times 55] / [1 \times 74.000]\}^{1/2}$

t_{ID} = 0,65 años ≈ 7,96 meses ≈ **8 meses**

Ejemplo 5.3.15
Supongamos el ejemplo anterior pero ahora el contexto operativo contempla dos líneas de envasado, cada una con una sopladora y un compresor. El compresor de respaldo es capaz de alimentar en forma indistinta a cualquiera de los dos compresores en caso de avería, sólo que uno por vez.

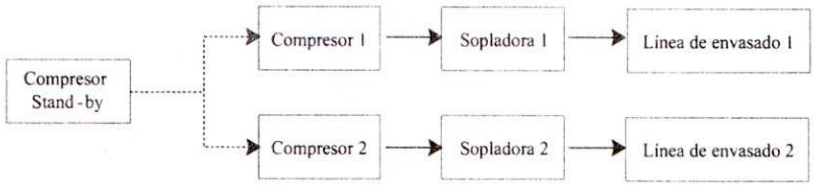


Figura 5.3.8
Dos líneas de envasado con un único compresor en stand-by.

Las consecuencias económicas que representan la detención de una línea son las mismas que las del ejemplo anterior. De igual forma para el resto de los datos.
Calcular para este nuevo contexto operativo el tiempo entre intervenciones detectivas.

El costo que significa la detención de una línea es $ 74.000.

C_{fs} = $ 74.000

Si bien existe la posibilidad de que los dos compresores sufran una avería simultáneamente, y que podrían ocasionarse pérdidas mayores a $ 74.000, no debe tenerse en cuenta para la estimación de la frecuencia de inspección dado que el compresor redundante no tiene capacidad para alimentar a dos sopladoras. Se asume que la capacidad de diseño de los tres compresores (los dos en funcionamiento y el redundante) es la misma.
Esto no significa que no importe el costo que podría ocasionar la detención de las dos líneas simultáneamente, sólo que este valor no interviene en la estimación de la frecuencia detectiva.

C_{ID} = $ 55

Si el $MTBF_{fp}$ de cada compresor se estima en 24 años, la demanda de la función protegida ya no tendrá ese valor; por lo que:

$1/ MTBF_{fp} = 1/ MTBF_{(2\ compresores)} = 1/ MTBF_{(1\ compresor)} + 1 / MTBF_{(1\ compresor)} =$

$1/ MTBF_{fp}$ = 1/ 24 años + 1 / 24 años =

$MTBF_{fp}$ = **12 años**

En la ecuación 5.3.28 cambia el $MTBF_{fp}$ pero la cantidad de dispositivos redundantes sigue siendo 1 ($n = 1$), por tanto:

$$t_{ID} = \{[(1 + 1) \times 12^{1} \times 12 \times 55] / [1 \times 74.000]\}^{1/(1+1)}$$

$$t_{ID} = \{[(2) \times 12^{1} \times 12 \times 55] / [1 \times 74.000]\}^{1/2}$$

$$t_{ID} = 0{,}46 \text{ años} \approx 5{,}6 \text{ meses} \approx \mathbf{5 \text{ meses}}$$

Los dos últimos ejemplos ponen de manifiesto una vez más la necesidad de destacar que los planes de mantenimiento son función directa del contexto operativo, provocando en este caso un cambio en la frecuencia de la rutina.

En el ejemplo 5.3.14, el mismo compresor redundante es protección de un sólo compresor, mientras que en el ejemplo siguiente lo es de dos compresores. Esto cambia la **demanda** de la función a respaldar, lo que finalmente obliga a cambiar el intervalo entre inspecciones.

Nótese que la consecuencia económica se mantiene equivalente para este cálculo, C_{fs} = $ 74.000. Se vuelve a comprobar el hecho de que equipos idénticos, pero actuando en contextos operativos diferentes, pueden tener planes de mantenimiento distintos.

Nota: Los ejemplos anteriores son meramente ilustrativos y tienen como única finalidad mostrar la metodología para estimar frecuencias de inspección.

5.3.4 Optimización de la frecuencia de inspección

La realidad muestra que al calcular el tiempo entre inspecciones detectivas (t_{ID}) se hacen varias aproximaciones, por lo que siempre es aconsejable ajustar las frecuencias de inspección de acuerdo al resultado obtenido de su implementación.

Una vez implementada la rutina de inspección detectiva, es necesario registrar todos los resultados favorables y desfavorables para, luego de un tiempo razonable, ajustar el $MTBF_{ds}$ y recalcular la frecuencia.

Resumen de aplicación

5.1 Mantenimiento Detectivo

- *El Mantenimiento Detectivo se aplica con el fin de reducir los fallos ocultos en los dispositivos Redundantes o de Protección, no habiendo encontrado otra estrategia pro-activa más eficaz (predictivo y preventivo).*

5.1.1 Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección

- *Desde el punto de vista operativo existen dos clases de sistemas de seguridad; los* ***redundantes*** *y los de* ***protección****.*

- ***Redundancia Activa Plena****. Sistema, equipo o componente que, aún funcionamiento a pleno régimen de carga, se instala para lograr la simultaneidad de un conjunto, desarrollando idénticas funciones que las del equipo protegido. Ej. Sistema de dos relés que actúan simultáneamente.*

- ***Redundancia Activa No plena y Homogénea****. Todos los elementos trabajan al mismo régimen pero al fallar uno de ellos el resto debe incrementar su nivel de carga para satisfacer la función del conjunto y cumplir con la capacidad estipulada. Ej. Sistema con múltiples correas de transmisión.*

- ***Redundancia Activa No plena y Heterogénea****. Ciertos elementos funcionan a mayor velocidad que otros, y ante la falla de éstos, los demás deben, en conjunto, garantizar la demanda de carga o volumen del grupo funcional completo.*

- ***Redundancia Pasiva****. Equipo en reposo y listo para funcionar si ocurre una avería operacional del elemento protegido. Ej. Un banco de baterías para soportar una caída de tensión temporal de la red principal de alimentación eléctrica.*

- ***Protección Interruptiva****. Una protección es interruptiva si su función es desafectar, desconectar o detener total o parcialmente al sistema protegido ante una avería o situación peligrosa de éste. Ej. Un disyuntor diferencial.*

- ***Protección Contensiva****. Elementos que reducen o eliminan las consecuencias de los fallos del equipo o función protegida. Ej. Un sistema de air-bag.*

- ***Protección Indicativa****. Su finalidad es poner en conocimiento a las personas que se produjo o se está por producir una situación anormal. Ej. Alarmas e indicaciones de tablero.*

5.1.2 Definición de Mantenimiento Detectivo

- *Es el conjunto de rutinas / tareas aplicadas para poner de manifiesto los fallos ocultos que ocurren sobre dispositivos redundantes o de protección, por medio de chequeos regulares de su funcionamiento o de alguna variable.*

5.1.3 Fallos Ocultos

- *Un modo de falla es oculto si, suponiendo que es el único que se produce, no se hace evidente a los usuarios durante la operación normal del sistema considerando, además, que no se realizan tareas de mantenimiento y sin importar el tiempo trascurrido.*

- ***Fallo Oculto Estático.*** *Un fallo oculto es estático si ocurre sobre algún componente redundante o de protección no cargado. Ej.: Fallos ocultos en redundancias pasivas (equipos en stand-by).*

- ***Fallo Oculto Dinámico.*** *Se presentan sobre dispositivos redundantes y cargados.*

5.1.4 Fallas Simultáneas

- *La falta de disponibilidad de un equipo redundante o de protección tiene su verdadero impacto cuando se combina con la avería (falla funcional) del equipo que se intenta resguardar. Si esta combinación se presenta, se dice que ha ocurrido una falla simultánea.*

- *La "cantidad" de mantenimiento detectivo es función de la gravedad que implica la falla simultánea.*

- *Hay situaciones en las que el mantenimiento detectivo puede aplicarse en forma combinada con otras estrategias, por ejemplo para los arreglos que demandan alta confiabilidad.*

5.1.5 Aplicación del Mantenimiento Detectivo

- *Debe considerarse la aplicación de rutinas detectivas si realmente el fallo es oculto y si no ha sido posible encontrar otra tarea pro-activa (preventiva, predictiva, etc.) que reduzca la posibilidad de falla simultánea a valores tolerables.*

5.1.6 Reducción de la probabilidad de Falla Simultánea por diseño

- *Muchos diseños tecnológicos buscan transformar en evidentes los fallos ocultos (al menos por algún tiempo y hasta cierto nivel). Estos elementos "avisan" cuando entran en un estado de indisponibilidad y se los llama dispositivos con seguridad intrínseca.*

5.1.7 Cómo identificar Fallos Ocultos

- *Para catalogar a un fallo como oculto debe asumirse que no se realiza ninguna acción de mantenimiento sobre el dispositivo redundante o de protección.*

5.2 Manejo del Riesgo Industrial

- *Las evaluaciones probabilísticas de riesgo buscan cuantificar las consecuencias de los fallos con gran impacto en la seguridad personal, en el medio ambiente o en los intereses económicos de la organización.*

- *Las organizaciones modernas y la sociedad están tomando cada vez más conciencia del Riesgo, y hay cada vez más interés en controlarlo. Controlar el riesgo no es eliminarlo por completo.*

5.2.1 Riesgo y nivel de aceptación

- *El riesgo es la probabilidad de que un suceso no deseado provoque un accidente durante la ejecución de una actividad. Es un parámetro probabilístico cuya valoración es subjetiva.*

- *Como primera aproximación el riesgo se caracteriza por dos aspectos: Probabilidad de Ocurrencia (P) y Magnitud de sus Consecuencias (C).*

- *Las Matrices de Riesgo califican el riesgo y lo presentan como una combinación de probabilidades y consecuencias.*

5.2.2 Riesgo Laboral

- *"La Evaluación de Riesgos es el proceso de valoración de los daños que podrían ocasionarse a consecuencia del riesgo que entraña, para la salud y seguridad de los trabajadores, la posibilidad de que se verifique un determinado peligro en el lugar de trabajo".*

- *El método William T. Fine evalúa el grado de peligrosidad (GP) como el producto de tres factores: Exposición (E), Probabilidad (P) y Consecuencia (C). La Exposición tiene en cuenta la frecuencia a la que el personal se expone al riesgo que se evalúa. La Probabilidad es la posibilidad de que un riesgo termine en accidente. La Consecuencia, refleja y estima el resultado final de un accidente.*

5.2.3 Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo - EPR

- *El nivel aceptable de riesgo se maneja mediante las evaluaciones probabilísticas de riesgo (EPR). Cuando se determina la frecuencia de inspección de una tarea detectiva, es útil contar con una estimación de la probabilidad de falla tolerada para cada sector, área, equipo y modo de falla.*

5.2.4 Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo

5.2.4.1 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

- *Técnica que permite determinar los potenciales problemas de un activo mantenible.*

- *El proceso se inicia con la descripción del contexto operativo y con la identificación de todos los subsistemas y componentes. Se establecen todas las condiciones normales de proceso (contexto operativo y funciones), las posibles fallas, las causas raíz, los efectos y sus consecuencias. Luego, se proponen acciones para controlar dichas consecuencias.*

5.2.4.2 HAZOP (Hazard and Operability Analysis)

- *Técnica cualitativa orientada a identificar situaciones de riesgo. Parte de la hipótesis que todos los problemas de operación y los accidentes en general se producen como consecuencia de la desviación de ciertas variables de proceso. Se identifican los riesgos potenciales para la operación, para la seguridad del personal (propio y/o terceros), para la seguridad de terceros (fuera de las instalaciones) y para el medio ambiente. Un equipo formado por personal idóneo de producción y mantenimiento (liderado por un facilitador) analiza los potenciales riesgos de la instalación a través del estudio de las intenciones que forjaron el diseño, de las desviaciones que puede padecer y de las posibles causas y consecuencias. El resultado final es una lista de recomendaciones fundamentadas cuya implementación permitirá reducir el riesgo existente.*

- *En los proyectos de nuevas instalaciones, el HAZOP es una herramienta válida para detectar problemas en las etapas de diseño.*

5.2.4.3 FTA (Fault Tree Analysis)

- *El Árbol de Fallas es un método analítico y deductivo que tiene como finalidad simular situaciones de causa y efecto que pueden conducir a una falla funcional severa (evento analizado). Permite establecer el riesgo propio de cada una de las situaciones potenciales de falla. Es una técnica de carácter proactivo que analiza las fallas o sus causas con anterioridad a que se manifiesten.*

- *Se parte del hipotético suceso (evento final no deseado) que se quiere evitar. Es posible el análisis simultáneo de múltiples causas. Es recomendable para instalaciones con elevada cantidad de sistemas de seguridad (redundantes o de protección).*

- *El diagrama de árbol se estructura mediante operadores ó puertas lógicas. Para el análisis se asigna a cada suceso su probabilidad de ocurrencia obteniendo, finalmente, la de los sucesos intermedios y la del suceso final. Es una herramienta que debe usarse por personal técnico altamente calificado y que, además, conozca la metodología.*

5.2.4.4 ETA (Event Tree Analysis)

- *El Árbol de Eventos es un método analítico e inductivo que estructura la secuencia de eventos básicos que finalmente pueden desencadenar en un accidente concreto. Consiste en proponer un evento "disparador" no deseado del que se conoce la frecuencia de ocurrencia, y luego analizar las consecuencias que ejerce sobre el resto del conjunto, teniendo en cuenta la efectividad de las seguridades, controles, barreras, protecciones contensivas, alarmas, etc.*

- *Se representa por medio de un esquema arbóreo horizontal que considera las cadenas causa - efecto de los eventos que llegan finalmente a capitalizarse en una falla, permitiendo conocer lo que podría haber sucedido de concretarse la concatenación de los eventos planteados.*

5.3 Frecuencia para las Rutinas Detectivas

- *Cualquier verificación detectiva de disponibilidad debe realizarse asegurando que el componente funcionará correctamente cuando inicie su servicio, luego de implementar dicha verificación.*

- *Una prueba en caliente es aquella que chequea la función en su totalidad (completa). Por ejemplo, los sistemas eléctricos de seguridad están constituidos por varios elementos: sensores, cables, interruptores, circuito eléctrico, lógica, etc. Si se establece una tarea detectiva sólo para el sensor, podrá aparecer un modo de falla sobre el resto de los elementos que pase desapercibido. Para evitar esto, y si es técnicamente posible, se prefiere chequear al sistema integralmente.*

- *Se asume que todos los elementos analizados responden a la ley de distribución exponencial (λ=cte.). También, que el tiempo de reparación de la función oculta (si se encuentra dañada) es despreciable frente al tiempo de servicio. Si el tiempo de reparación es significativo frente al de operación normal, el sistema protegido estará desprovisto de respaldo durante mucho tiempo. Se deberá, entonces, contar con otro sistema alternativo que reemplace a la función de seguridad o bien retirar de servicio completamente todo el conjunto hasta tanto se haya subsanado el fallo.*

5.3.1 Disponibilidad Intrínseca

- *La probabilidad condicional de se produzca una falla simultánea es el producto de la probabilidad de que falle el equipo protegido y la probabilidad de que el dispositivo de seguridad se encuentre en estado de falla.*

- *Estableciendo la probabilidad tolerada para la falla simultánea, y conociendo la tasa de fallas del equipo a resguardar, puede calcularse la máxima probabilidad de falla tolerada para el dispositivo de protección. El mantenimiento detectivo se centra en garantizar que la probabilidad de falla del dispositivo de seguridad no sobrepase el valor tolerado.*

5.3.2 Estimación del intervalo entre Inspecciones

- *La verificación (inspección) detectiva se realiza a intervalos regulares de tiempo directamente relacionados con los tres parámetros mencionados.*

- *Las variables principales para estimar las frecuencias de inspección son: $MTBF_{fp}$ (tiempo medio entre fallas del equipo o función a proteger), $MTBF_{ds}$ (tiempo medio entre fallas del dispositivo de seguridad) y $MTBF_{fs}$ (tiempo medio entre fallas tolerado para la falla simultánea).*

5.3.3 Cuando la Falla Simultánea únicamente tiene impacto económico

▸ *Si la falla simultánea no tiene consecuencias para la seguridad de las personas o el medio ambiente, el riesgo se estima únicamente en funcion de las consecuencias económicas.*

Indicador	Fórmula	Descripción / Aplicación
Probabilidad de falla	$F(t) = 1 - C(t) \approx \lambda t$	*Aproximación lineal para la ley de distribución exponencial.*
Indisponibilidad permitida para la función oculta	$I_{ds} = 1 - D_{ds}$	
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = 2\ MTBF_{ds} \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}\right)$	*Tiempo entre inspecciones detectivas para un único dispositivo redundante o de protección y para fallas simultáneas con consecuencias en Seguridad.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = MTBF_{ds} \sqrt[n]{(n+1)\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}}$	*Tiempo entre inspecciones para n dispositivos redundantes o de protección que protegen a la misma función y para fallas simultáneas con consecuencias en Seguridad.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = \frac{1}{\lambda_{ds}} \sqrt[n]{(n+1)\frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{fp}}}$	*Tiempo entre inspecciones para n dispositivos redundantes o de protección que protegen a la misma función y para fallas simultáneas con consecuencias en Seguridad.*
Cantidad de unidades que deben fallar para que todo el sistema de protección falle	$x = n + 1 - j$	*n: Cantidad de unidades de protección.* *j: Cantidad de unidades que deben actuar para activar el sistema de protección.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = MTBF_{ds} \sqrt[x]{\frac{x!(n-x)!}{n!}(X+1)\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}}}$	*Para n dispositivos redundantes o de protección y cuando deben fallar x dispositivos para indisponer el sistema de protección. Para fallas simultáneas con consecuencias en Seguridad.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = \left(\frac{MTBF_{fp}}{MTBF_{fs}} - q\right)\frac{2\ MTBF_{ds_{Stand\text{-}by}}}{(1-q)}$	*Cuando existe una probabilidad q de que el elemento chequeado quede indisponible luego de la inspección. Para fallas simultáneas con consecuencias en Seguridad.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = \left(\frac{2\ MTBF_{ds}\ MTBF_{fp}\ C_{ID}}{C_{fs}}\right)^{1/2}$	*Tiempo entre inspecciones detectivas para un único dispositivo redundante o de protección y para fallas simultáneas con consecuencias económicas únicamente.* C_{ID}*: Costo de la inspección detectiva.* C_{fs}*: Costo de la falla simultánea.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = \left(\frac{(n+1)\ MTBF_{ds}^{\ n}\ MTBF_{fp}\ C_{ID}}{n\ C_{fs}}\right)^{1/n+1}$	*Tiempo entre inspecciones detectivas para n dispositivos redundantes o de protección y para fallas simultáneas con consecuencias económicas únicamente.* C_{ID}*: Costo de la inspección detectiva.* C_{fs}*: Costo de la falla simultánea.*
Frecuencia de inspección detectiva t_{ID}	$t_{ID} = \left(\frac{MTBF_{fp}\ MTBF_{ds}^{\ x}\ C_{ID}}{x\ r\ C_{fs}}\right)^{1/x+1}$	*Tiempo entre inspecciones detectivas para n dispositivos redundantes o de protección y cuando deben fallar x dispositivos para indisponer el sistema de protección. Para fallas simultáneas con consecuencias económicas únicamente.* C_{ID}*: Costo de la inspección detectiva.* C_{fs}*: Costo de la falla simultánea.*
Factor r	$r = \frac{n!}{(x+1)\,x!\,(n-x)!}$	*Para ser utilizado en la ecuación anterior.*

5.3.4 Optimización de la frecuencia de inspección

▸ *Una vez implementada la inspección detectiva, es necesario registrar los resultados favorables y desfavorables para, luego de un tiempo razonable, ajustar el* $MTBF_{ds}$ *y recalcular la frecuencia.*

Capítulo 6

Acciones Reactivas de Mantenimiento

Experiencia es el nombre que los hombres dan a sus errores. Yo puedo soportar la fuerza bruta, pero la razón bruta es completamente intolerable[1].

---

1 Oscar Wilde (1854 - 1900).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Comprender los conceptos básicos acerca de las Acciones Reactivas y diferenciar el alcance de los tipos de Mantenimiento Correctivo, Restaurativo y Mejorativo.
- √ Evaluar las razones por las que puede ser conveniente realizar Mantenimiento Correctivo.
- √ Conocer las ventajas y las limitaciones de cada uno de los tipos de Mantenimientos Reactivos.
- √ Aportar al área de Mantenimiento los conceptos básicos para alcanzar una adecuada gestión del Mantenimiento Correctivo.
- √ Planificar tareas de Mantenimiento Correctivo según las consideraciones del caso.
- √ Establecer un criterio de prioridades para la emisión de Avisos de Trabajo (Pedidos) de acuerdo a las necesidades de cada organización.
- √ Programar y planificar tareas de Mantenimiento Restaurativo y Mejorativo.
- √ Optimizar la gestión integral del área de Mantenimiento con acciones de mejora.

Índice de Contenidos

6.1 Introducción
Evolución histórica
Conveniencia técnico-económica

6.2 Mantenimiento Correctivo (Acción Reactiva No Programada)
Gestión del Mantenimiento Correctivo
Planificación del Mantenimiento Correctivo
Criterios de Prioridad
Ventajas y Desventajas del Mantenimiento Correctivo

6.3 Mantenimiento Restaurativo (Acción Reactiva Programada)

6.4 Mantenimiento Mejorativo (Acción Reactiva Programada)
Objetivos
Una particularidad, el Mantenimiento Curativo

Resumen de aplicación

6.1 Introducción

Los capítulos precedentes fueron lo suficientemente amplios como para establecer claramente los conceptos fundamentales acerca de las **Acciones Pro-activas**. Aquí se pretende abordar la problemática de las **Acciones Reactivas**.

Partiendo de la base de que no realizar ninguna tarea Pro-activa puede ser una estrategia de mantenimiento válida[1], se analizarán los tres tipos de mantenimiento ya mencionados en el primer capítulo y que se muestran en la figura 6.1.1.

Una acción **reactiva** consiste en actuar cuando, naturalmente y en condiciones normales de operación, se ha descubierto un estado de funcionamiento no deseado; vale decir, se toma alguna medida ante fallas, desvíos o sus consecuencias luego de su ocurrencia.

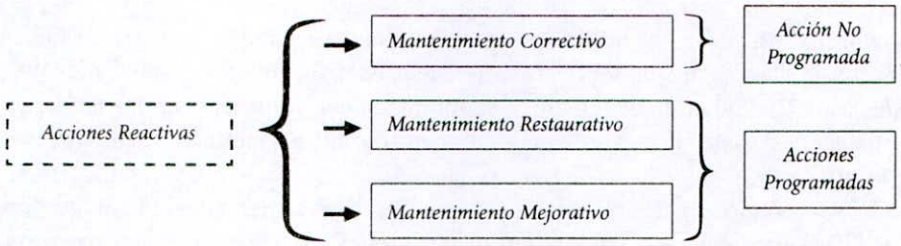


Figura 6.1.1 Clasificación de las Acciones Reactivas.

Aún considerando al **Mantenimiento Correctivo** como acción **No Programada**, cierto es que puede ser objeto de **Planificación**. El hecho de ser una acción no programada significa que el momento de su ejecución es tan aleatorio como la aparición de la falla que pretende corregirse; de ahí, la designación de Acción No Programada. Sin embargo, y en función del tiempo total correctivo, puede resultar útil una Planificación previa al inicio de los trabajos. Este tema se aborda con mayor profundidad en el Apartado 6.2.

Por su parte, el **Mantenimiento Restaurativo** y **Mejorativo** se consideran acciones **Programadas** porque la detención de la máquina puede programarse. Esta programación se asume válida a partir de la identificación de un desvío, falla sintomática o anomalía como resultado de aplicar otro tipo de mantenimiento (proactivo, predictivo, preventivo o detectivo), momento a partir del cual es posible alguna programación para realizar la intervención antes de detener la marcha del equipo.

En rigor, el lector pensará que una acción correctiva (aún de emergencia) de hecho involucra una restauración. Si bien esto es cierto, se prefiere considerar las acciones no programables como **correctivas**, dejando para el resto las **restauraciones** y **mejoras** sobre el diseño original. De todas maneras, siempre será apropiado contar con un sistema de gestión capaz de atender y satisfacer las necesidades de reparar fallas imprevistas o desvíos, que podrán surgir en forma inesperada o a consecuencia de alguna inspección programada.

6.1.1 Evolución histórica

Durante mucho tiempo fue costumbre esta *forma de mantener* (principalmente el Correctivo), porque las obligaciones de los operadores y mantenedores no estaban bien diferenciadas. Las personas encargadas de operar la máquina también la restauraban o reparaban. Los objetivos de productividad de aquellos tiempos no hacían necesaria la especialización de tareas. Con la revolución industrial, el crecimiento económico y el aumento de la complejidad técnica, se hizo imprescindible la especialización. Por ello, y sobre todo después de la primera guerra mundial, se produjo una subdivisión del trabajo en todas las actividades que obligó a distribuir ordenadamente las tareas en mantenimiento y producción.

Lamentablemente algunos responsables de mantenimiento parten de la idea que la urgencia de las reparaciones determina las pautas de trabajo. Sin embargo, mirando a la organización desde un punto de vista sistémico, la eficiencia global está determinada por el departamento o subproceso que peor funcione.

---

1 Para un activo dado y siempre que se satisfagan ciertas condiciones de seguridad y economía.

Por tanto, si por cualquier motivo se decide optar por acciones reactivas, éstas deben planificarse logrando el menor perjuicio sobre la producción.

6.1.2 Conveniencia técnico-económica

En otras circunstancias, la decisión de reaccionar posteriormente a la falla es producto de un análisis costo - beneficio. Como se verá, no siempre trae el máximo provecho integral evitar que sucedan **todos** los modos de falla, sobre todo cuando éstos no tienen consecuencias para la seguridad, el medio ambiente, la producción o la integridad de los activos físicos relevantes. Esto es válido bajo un determinado contexto operativo actuante y habiendo evaluado previamente las consecuencias de **cada** modo de falla; téngase presente que dejar en funcionamiento un equipo hasta la rotura (falla funcional) puede agravar las fallas sintomáticas y convertirlas en irreversibles provocando peores consecuencias.

Pero los recursos son limitados, por lo que utilizarlos donde resulta más ventajoso redunda en beneficios. Así, cobran valor los análisis rigurosos sobre las consecuencias de los modos de falla y las medidas a adoptar en cada caso[1]. Cualquier análisis técnico-económico debe considerar un horizonte de validez definido que considere los gastos directos de mantenimiento como, así también, los financieros en que pueda incurrir la compañía.

Los métodos y modelos evolucionan favorablemente y aparecen nuevas herramientas de gestión organizacional como el TPM que pretende optimizar tanto las acciones *proactivas* como las *reactivas*. Todavía en algunas empresas el personal encargado de comunicar las averías es el operador de la máquina, mientras que el responsable de realizar las reparaciones es el mantenedor. Afortunadamente esta idea está cambiando con la aplicación de nuevas técnicas de gestión, donde el personal que opera el equipo incorpora a sus funciones tareas de mantenimiento llamadas de *primera línea* mediante rutinas básicas que le son transferidas de acuerdo a sus capacidades.

Obsérvese que este concepto vuelve a requerir que el personal de producción realice tareas de mantenimiento; sólo que ahora transferidas gradualmente de acuerdo a las competencias adquiridas y a los tiempos disponibles. El tiempo de utilización de los talentos humanos no es infinito.

Algunas veces por desidia o negligencia, otras por necesidad y, en ciertas ocasiones por conveniencia, se opta por **Acciones Reactivas**. Analizaremos entonces cada una de ellas.

---

1 Principalmente los análisis RCM, ver Capítulo 7.

6.2 Mantenimiento Correctivo (Acción Reactiva No Programada)

El Mantenimiento Correctivo, también llamado de emergencia o de rotura, consiste en reparar las fallas funcionales tras su ocurrencia. En lo personal se prefiere no utilizar el término emergencia porque denota explícitamente una situación de caos; en realidad, no siempre la rotura imprevista de un mecanismo, elemento o equipo debe tratarse como emergencia. En su lugar, asociamos al mantenimiento correctivo con una tarea **No Programada** que se lleva a cabo en forma inmediata a la falla funcional para restablecer la operación de la máquina[1]. La velocidad con que debe solucionarse la falla dependerá de las consecuencias que ésta produzca en el negocio (seguridad, medio ambiente, proceso productivo o activo). Si la decisión de realizar sólo mantenimiento correctivo para cierto equipo no surge de un análisis técnico-económico, puede suceder que los inconvenientes de su aplicación sean mayores que sus ventajas, siendo que la falla se detectará durante la operación del sistema.

Un proceder común que pretende erróneamente alcanzar el mayor rendimiento, es pasar por alto fallas sintomáticas como flojedades, ruidos extraños, anomalías, exceso de temperatura, etc. Tal comportamiento, tarde o temprano, afectará la funcionalidad del conjunto obligando a la aplicación de mantenimiento correctivo. Este tipo de situaciones se evitan con *mantenimiento autónomo* desplegado por los operadores de la máquina y promovido por el TPM. En tal sentido, el talento del personal es primordial. Bien conocido es el dicho: *Debe lograrse que el personal autónomo que realiza tareas de mantenimiento sea capaz de* ***ver*** *y no sólo de* ***mirar***.

Sin embargo, y aún con estudios serios de confiabilidad, es imposible eliminar totalmente el Mantenimiento Correctivo; siempre existirán averías impredecibles que requieran de una rápida solución. Negar su existencia no hace más que empeorar las cosas; debemos ser capaces de aceptarlo, gestionarlo apropiadamente y lograr de él los mejores resultados. A continuación se enumeran algunas tareas típicas llevadas a cabo por el Mantenimiento Correctivo.

- √ Diagnóstico y búsqueda de elementos con falla luego de la detención del equipo.
- √ Desmontaje, limpieza y montaje de piezas y repuestos dañados.
- √ Sustitución de conjuntos cuya condición impiden la operación normal de la máquina.
- √ Ajuste, calibración, alineación, puesta a punto y pruebas de funcionamiento de elementos que impiden cumplir con las funciones de los equipos.
- √ Tareas menores como reposición de térmicos o cambio de fusibles, instrumentos y reles.

6.2.1 Gestión del Mantenimiento Correctivo

Una gestión eficaz de mantenimiento correctivo produce beneficios en seguridad, disponibilidad y reducción de costos. Gestionar el Mantenimiento Correctivo es obligación del departamento de Mantenimiento; por tal motivo se debe:

- √ Dotar al personal con las capacidades suficientes para diagnosticar fallas y efectuar reparaciones en tiempo y forma.
- √ Contar con procedimientos y hojas de trabajo fáciles de entender. Mantener actualizadas las tarjetas de seguridad y desconexión de equipos eléctricos, neumáticos, etc.
- √ Realizar una adecuada planificación de acuerdo a la envergadura de las tareas.
- √ Plantear fuertes objetivos que reduzcan el tiempo de reparación (T_R), lo que aumentará la disponibilidad.
- √ No descuidar el riesgo de accidentes durante la ejecución de los trabajos.
- √ Reducir el MTTR (tiempo medio de reparación) optimizando los equipos y procedimientos de mantenimiento correctivo.
- √ No consumir más repuestos ni insumos que los necesarios, como así también optimizar la utilización de mano de obra; todo lo cual puede mejorarse con planificación.
- √ Reparar definitivamente las fallas para reducir su recurrencia; se mejora, así, el MTBF (período promedio entre fallas). Finalizada una reparación es recomendable hacer un *análisis de falla (ADF)*. (Ver Capítulo 7, sección 7.3.5).

---

1 El ***Mantenimiento Restaurativo*** *persigue restituir un estado de* ***Condición Básica****, no siendo necesario que se haya manifestado aún una falla funcional con detención de marcha (ver Apartado 6.3).*

6.2.2 Planificación del Mantenimiento Correctivo

Como se mencionó con anterioridad, el Mantenimiento Correctivo no es programable aunque sí **planificable**, según sea el caso. Una vez ocurrida la falla, el tiempo total correctivo (T_{TC}) se compone del tiempo de diagnóstico (T_D) y del tiempo ocupado en la reparación (T_R).

$$T_{TC} = T_D + T_R \qquad (6.2.1)$$

Como puede imaginarse, la *mantenibilidad* es trascendental para mejorar el T_{TC}. Un activo cuyo tiempo de diagnóstico y reparación es bajo, permite ser reparado en menos tiempo. Las acciones de **Mantenimiento Mejorativo** que aumentan la mantenibilidad, reducen drásticamente el T_R.

Tiempo de Diagnóstico

El tiempo de diagnóstico (T_D) es el tiempo que insumen los especialistas de mantenimiento en determinar qué ha sucedido en la máquina y cómo lograr una rápida solución. La capacitación y experiencia del personal técnico, así como un rápido acceso a la información (historial de fallas, despieces, planos y lista de causas probables o *trouble shooting*), reducen drásticamente este tiempo. La experiencia demuestra que en las especialidades, eléctrica, electrónica e instrumentación, los tiempos de diagnóstico (T_D) son mayores que los de reparación (T_R); mientras que ocurre lo contrario en mecánica e hidráulica donde generalmente es mayor el tiempo en reparar que en identificar una falla[1].

Tiempo de Reparación

El tiempo de reparación (T_R) es aquel destinado a solucionar el problema completamente y lograr que el sistema quede en condición productiva. Influyen entre otros, la gravedad del daño, la mantenibilidad del activo, la experiencia de los reparadores y el modelo de gestión vigente en la organización. Para más claridad, el T_R suele subdividirse en los siguientes tres factores.

Tiempo de Planificación

El tiempo de planificación (T_P) se incluye dentro del tiempo de reparación (T_R). La planificación de un trabajo podrá tener distintas formas. Habrá planificaciones que involucren mucho tiempo y recursos (inclusive la confección de un diagrama de Gantt); mientras que para otras, sólo será suficiente una conversación informal entre los participantes del trabajo.

Una adecuada planificación del Mantenimiento Correctivo debe:

- √ Definir el alcance de los trabajos en base al diagnóstico establecido.
- √ Reunir o elaborar los procedimientos y hojas de trabajo.
- √ Seleccionar las herramientas, repuestos e insumos (lubricantes, electrodos, combustibles, etc.) necesarios.
- √ Definir el personal afectado a cada tarea por especialidad. Planificar turnos, grupos de trabajo, refrigerios, descansos y la secuencia de las tareas y subtareas.
- √ Reunir todas las tarjetas de seguridad (TS), órdenes de trabajo (OT), hojas de trabajo (HT), instructivos de puesta en marcha y operación (IPM), etc.
- √ Reconocer los estándares de aceptación para la entrada en servicio del equipo.
- √ Establecer las rutinas de prueba, puesta en marcha y verificación de funcionamiento.
- √ Confeccionar un diagrama de Gantt si la envergadura del trabajo lo justifica.

En la mayoría de las reparaciones **correctivas** la planificación es mental, y se irá alterando conforme se desarrollan los acontecimientos. Esto no es malo cuando la intervención es breve y requiere pocos recursos (repuestos, mano de obra y terceros especializados). Sin embargo, en ocasiones, las tareas demandan mayor tiempo de ejecución (T_E) y la participación simultánea de varias especialidades. Para estos casos es preciso planificar. Se ha demostrado que una planificación adecuada para trabajos que,

---

1 "Administración Moderna de Mantenimiento" Lourival Tavares, Capítulo1 página 2.

por ejemplo, superan las 12 horas, está más que justificada. Ciertas organizaciones separan las acciones correctivas de acuerdo al tiempo estimado de trabajo, constituyendo dos grupos. Aquellas que demorarán más de 12 horas se consideran de planificación obligatoria; por el contrario, si la tarea insume menos de 12 horas apenas requiere una planificación mental.

La planificación está directamente relacionada con los gastos de Mantenimiento Correctivo. Un conjunto de tareas que requiera planificación, mostrará mayor costo inicial pero, seguramente, el costo total integral será menor. Contrariamente, las tareas denominadas *no planificables* costarán menos aún sin planificación.

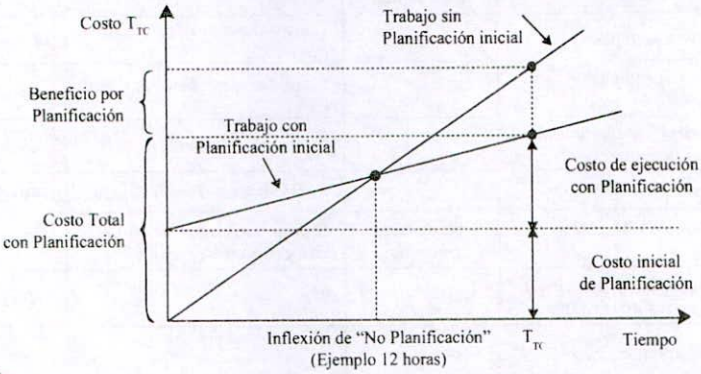


Figura 6.2.1 Costo total correctivo por trabajos con y sin planificación[1].

Tiempo de Ejecución

El tiempo de ejecución (T_E) es aquel destinado exclusivamente a la reparación. Depende de la capacidad técnica del personal involucrado, así como del grado de planificación alcanzado y la mantenibilidad del activo. En muchos casos, T_E es inferior al resto.

La mayor pérdida de tiempo, que perjudica ciertamente al T_{TC}, se debe a todas las tareas *periféricas* a la reparación misma como ser: emisión de órdenes y permisos de trabajo, desconexión y conexión de equipos, traslado de herramientas, materiales e insumos, traslados del personal, dificultades de comunicación, etc. Los tiempos periféricos deben reducirse y estandarizarse, aunque individualmente parezcan menores. La suma de todos ellos, en muchos casos, causa serias pérdidas de tiempo que afectan la disponibilidad total de Planta. Un modelo de gestión ajustado permite obtener resultados altamente satisfactorios en la atención de fallas o averías imprevistas[2]. La reducción de cualquiera de los tiempos mencionados reduce el T_{TC} que, a su vez, mejora el MTTR.

Tiempo de Verificación

Por último, consideramos el tiempo destinado para las pruebas de verificación (T_V). Las tareas incluidas aquí están destinadas a comprobar que el sistema quedó efectivamente reparado y es capaz de alcanzar el régimen nominal de operación.

Los Procedimientos de Reparación (Ver figura 6.2.2) deben contemplar criterios o parámetros de aceptación para la entrada en servicio. Algunas pruebas de aceptación suelen demorar muchos minutos, e incluso horas. Para llevarlas adelante se requiere la participación del personal de mantenimiento y el de operación; en conjunto son quienes más conocen sobre el funcionamiento del equipo y el régimen nominal esperado.

$$T_{TC} = T_D + T_R = T_D + (T_P + T_E + T_V) \qquad (6.2.2)$$

Es muy importante contar con estándares para trabajos repetitivos de mantenimiento correctivo que disminuyan el T_R, pero, por sobre todas las cosas, que eviten equivocaciones y bajen el riesgo de accidente.

Por ejemplo, los trabajos de desmontaje y montaje, los procedimientos de soldadura, de ajuste, de alineación, etc. pueden estar tipificados y tener una identificación electrónica, lo que facilita el acceso a la información en cualquier ocasión. Tipificar los Procedimientos de Reparación más importantes ayuda a gestionar y planificar el Mantenimiento Correctivo. Las hojas de trabajo (HT) deben confeccionarse con la participación de las personas que más conocen del equipo y de todas las especialidades; deben participar, además, supervisores y personal de seguridad.

---

1 Adaptación del libro "Gestión Integral de Mantenimiento" de Luis Navarro Elola y otros autores, página 92.

2 Un ejemplo de alta eficiencia "correctiva" lo alcanzan los equipos de competición automovilísticos, en los que la mantenibilidad (vista como "intercambiabilidad" para ciertas piezas en competencia) está optimizada al máximo. Se combinan dos factores primordiales: excelente ***Planificación*** *y altísima* ***Mantenibilidad****.*

Cada trabajo se disgrega en subtareas secuenciales que describen el orden de ejecución y las precauciones a tener en cuenta. La figura 6.2.2 muestra un Procedimiento de Reparación para sustituir una bomba centrífuga.

Procedimiento de Sustitución N° 0012BC/SP					
Reemplazo de Bombas Centrífugas modelo "C3"					
# Op.	***Descripción de la operación***	***Herramientas y Repuestos***	**Observaciones**	**Especialidad**	**Tiempo estimado (min)**
1	*Identificar el activo a reemplazar*		*Utilizar elementos de protección personal*	*Mecánica*	*15*
2	*Verificar existencia de equipo adecuado para reemplazar*		*Consultar stock bombas reparadas*	*Mecánica*	*10*
3	*Confeccionar tarjeta de desconexión eléctrica y solicitar la desconexión*		*Anotar N° de tarjeta en la OT*	*Eléctrica*	*5*
4	*Desconexión eléctrica*		*Anotar N° de OT en la Tarjeta*	*Eléctrica*	*10*
5	*Trasladar bomba y herramientas al lugar de trabajo*	*Caja de herramientas*	*Utilizar elementos de protección personal*	*Mecánica*	*15*
6	*Cerrar válvula agua de refrigeración y desconectar mangueras y conexiones*			*Mecánica*	*3*
7	*Retirar carcaza de acople elástico*			*Mecánica*	*5*
8	*Retirar elemento elástico del acople*			*Mecánica*	
9	*Retirar tornillos brida admisión y descarga de bomba*			*Mecánica*	*15*
10	*Desvinculada la bomba, aflojar tornillos de la base y retirarlos*			*Mecánica*	*15*
11	*Bajar la bomba utilizando el soporte y aparejo*	*Aparejo N° 003*	*Utilizar en todos los casos el aparejo mencionado*	*Mecánica*	*10*
12	*Subir la bomba de reemplazo con el aparejo y dejar en posición*	*Aparejo N° 003*	*Utilizar en todos los casos el aparejo mencionado*	*Mecánica*	*15*
13	*Limpiar con cepillo la superficie donde asientan las juntas*	*Cepillo, lija*	*Utilizar elementos de protección personal*	*Mecánica*	*5*
14	*Limpiar la base y zona de apoyo*	*Cepillo, lija*	*Utilizar elementos de protección personal*	*Mecánica*	*5*
15	*Montar las juntas en posición*	*Juntas PA-200*	*Sólo utilizar la junta mencionada.*	*Mecánica*	*2*
16	*Arrimar bulones de la brida de impulsión*			*Mecánica*	*5*
17	*Arrimar bulones de la brida de admisión*			*Mecánica*	*5*
18	*Arrimar bulones soporte de bomba*			*Mecánica*	*5*
19	*Alinear*			*Mecánica*	*10*
20	*Apretar bulones de bridas según la secuencia de las tareas 16, 17 y 18*			*Mecánica*	*5*
21	*Verificar lubricación*			*Mecánica*	*5*
22	*Solicitar conexión eléctrica*			*Mecánica*	*5*
23	*Conexión eléctrica*			*Eléctrica*	*10*
24	*Prueba*			*Mecánica*	*5*
					185

Figura 6.2.2
Procedimiento estándar para sustituir una bomba centrífuga de proceso.

6.2.3 Criterios de Prioridad

Toda empresa cuenta con algún sistema de comunicación. Existen aquellas que comunican los *Avisos de Trabajo* (AT), también llamados *Pedidos*, a través del teléfono o la radio. Otras cuentan, además, con un sistema informático capaz de gestionar los avisos por medio de Órdenes de Trabajo (OT), lo que brinda la posibilidad de registrar la información en el historial del equipo de manera inmediata[1].

1 Ver Sección 8.3 "Sistemas Informáticos de Mantenimiento (SIM)", Capítulo 8.

Sea cual fuere el caso, siempre es necesario un marco de prioridades **objetivo** que permita asignar correctamente los recursos y balancear la demanda **reactiva** con la **pro-activa**. Piense el lector que los tiempos en que el personal de mantenimiento hacía guardia esperando recibir el llamado para resolver una avería imprevista; ya casi no existen.

Cuando se aborde la problemática correspondiente al plantel de mantenimiento (Capítulo 10, *Organización del Mantenimiento*), se verá que la plantilla total (*oferta de talentos*) depende de la carga pro-activa requerida para asegurar la disponibilidad de planta pero también, de la tasa de demanda reactiva. El departamento de mantenimiento cumple con un volumen pro-activo tal que garantiza la continuidad operativa a mediano y largo plazo y también debe atender las necesidades surgidas imprevistamente. Se impone, entonces, la necesidad de contar con un método **objetivo** para asignar prioridades.

Muchas organizaciones discuten acaloradamente qué sistema aplicar al momento de asignar prioridades, y la mayor divergencia se presenta entre las áreas de mantenimiento y producción. Las opiniones son, por lo general, diametralmente opuestas en principio. Existen distintos criterios, pero cada compañía debe escoger aquel que más se ajuste a las necesidades de sus interlocutores. Es imposible asegurar que un sistema es mejor que otro. Sin embargo, debe establecerse un único criterio pues, de lo contrario, los requirentes tienden a clasificar todas las averías como urgentes e impostergables.

El ranking de prioridades adoptado debe permitir la ubicación de cada avería en la categoría adecuada, sin magnificar la urgencia ni la importancia. Cuando hablamos de avería nos referimos a la manifestación de uno o más modos de falla, con posibilidades de detener la marcha de una máquina.

A continuación se muestra un criterio de prioridades basado en cuatro categorías. Se trata únicamente de una guía para comprender las fronteras entre cada tipo de aviso.

Estados de Prioridad para Avisos Correctivos			
#	Descripción	La Avería....	Ejemplos
Aviso de Emergencia	Trabajos a realizar inmediatamente después de detectada la avería.	...pone en riesgo la vida de una o más personas, está provocando algún daño al medio ambiente, detiene algún proceso productivo con gran perjuicio en calidad y cantidad, o puede provocar daños muy costosos en las instalaciones.	Pérdidas y proyección de ácido en cañerías de transporte, detención de una embotelladora cuya producción no puede recuperarse con otras líneas o en algún otro momento, averías funcionales en un sistema de refrigeración de un horno rotativo que provoca severos daños en el equipo.
Aviso Urgente	Trabajos a realizar en el menor plazo posible, generalmente durante el mismo día de comunicada la avería.	...representa un riesgo de accidente no fatal, puede producir alguna contaminación en el medio ambiente si persiste por una jornada, ya está provocando un perjuicio menor en la producción, o puede provocar, a corto plazo, pérdidas económicas en la compañía de cualquier forma.	Daños en un sistema contra incendios, rotura de una máquina que obliga a realizar horas extras para recuperar la producción, desajuste de un sensor óptico que provoca mayor nivel de rechazo en las piezas producidas.
Aviso Importante	Trabajos a realizar durante la semana de comunicada la avería.	...no representa un riesgo para la seguridad de las personas ni para el medio ambiente aunque persista por unos días, provoca una pérdida menor de dinero a la empresa, o sólo tienen un impacto menor sobre la vida del activo. *Nota: De persistir la avería indefinidamente puede provocar las consecuencias de los estados anteriores.*	Daño en la bomba principal de un sistema de bombeo prioritario en el que tuvo que entrar en funcionamiento la bomba de stand-by (redundante), avería en cualquier máquina cuya función principal puede sustituirse con la alteración del proceso productivo.
Aviso Postergable	Trabajos a realizar una vez resueltos los avisos de prioridad anterior.	...no presupone ningún riesgo para la seguridad de las personas ni para el medio ambiente, no tiene ningún impacto desfavorable en la producción o, si lo tiene, es mínimo, o no representa una amenaza para la integridad del activo y sólo cuesta lo que cuesta la reparación del daño detectado.	Pérdida menor de agua en una unión bridada, flojedad en un panel de control, pérdida de agua de refrigeración en un sello mecánico, rotura o desprendimiento menor en la aislación térmica de un reactor, pérdida menor en trampas de vapor.

Tabla 6.2.1
Estados de Prioridad para Avisos de Trabajo Correctivos.

Un error muy común es intentar asignar a cada activo de Planta un nivel de prioridad preestablecido. Esto desconoce la *hipótesis del contexto*[1] (estudiar el equipo sin considerar su contexto operativo) y, además, presupone que el equipo siempre será víctima de los mismos modos de falla con las mismas consecuencias. Un mismo equipo puede sufrir varios modos de falla y no necesariamente todos tener las mismas consecuencias, por lo que la asignación de prioridades puede adoptar distinta valoración según el caso.

Ahora bien, si el ranking de prioridades preestablecido por activo se refiere exclusivamente a la detención del mismo o a la interrupción de sus funciones primarias, entonces tal vez dicho ranking pueda ser de utilidad. El riesgo que se corre al adoptar un ranking de prioridades por activo es que, independientemente de la falla y sólo por el hecho de haber sucedido, se movilice una acción contingente de emergencia cuando en realidad la consecuencia del modo de falla no lo amerite.

Cualquier sistema de comunicación empleado (teléfono, radio, mail o sistema de gestión informático) debe incluir en el Aviso de Trabajo el correspondiente nivel de prioridad.

6.2.4 Ventajas y Desventajas del Mantenimiento Correctivo

Las ventajas y desventajas más sobresalientes del Mantenimiento Correctivo se resumen a continuación.

Ventajas

√ Por lo general requiere poca planificación, excepto en trabajos de larga duración.
√ Si la consecuencia de la falla funcional es controlada, se aprovecha al máximo la vida de los elementos y no se sobre-mantienen las máquinas.
√ Se evitan grandes gastos preventivos y predictivos si la decisión de aplicar mantenimiento correctivo fue producto de un análisis costo-beneficio. Muchas empresas destinan sumas considerables de dinero en tareas pro-activas que no se justifican en lo económico.
√ Si la intervención técnica es adecuada, se restituye rápidamente la operación del equipo.

Desventajas

√ En intervenciones correctivas no controladas puede afectarse la disponibilidad de Planta deteniendo la producción y generando grandes pérdidas en cantidad y calidad.
√ Se incrementa sustancialmente el riesgo de accidentes, porque suele actuarse de forma acelerada y caótica.
√ Peligro de no contar con suficiente dotación al momento de suceder la avería.
√ Posible incremento del plantel permanente, con aumento indiscriminado de gastos fijos.
√ No siempre el personal que repara la avería conoce en profundidad la instalación o no cuenta con la información técnica suficiente. Las reparaciones no siempre son definitivas.
√ En ocasiones se improvisan soluciones que alteran el diseño original, lo cual disminuye la mantenibilidad en futuras intervenciones.
√ Pérdida de información valiosa para establecer las causas que produjeron la avería.
√ Se dificulta proyectar los gastos (costos) de mantenimiento y confeccionar presupuestos.

Es conveniente encontrar un equilibrio entre **capacidad de atención** ante averías repentinas (carga **correctiva**) y **dotación permanente óptima** e idónea. Se requiere, para ello, estudiar integralmente la tasa de demanda de averías de acuerdo a sus consecuencias.

Existen herramientas de mejora para evaluar la carga correctiva y establecer la dotación que satisfaga dicha demanda sin omitir la carga pro-activa. Lógicamente, tales variables son dinámicas y dependen de las consecuencias del fallo y del contexto operativo actuante. La carga correctiva depende, a su vez, del éxito (eficacia) de las acciones pro-activas, pues es posible asumir, en primera instancia, que a mayor éxito pro-activo menor carga correctiva. Sin embargo, el límite de tal afirmación está dado por el beneficio económico. En cierto punto, los esfuerzos para evitar acciones reactivas comienzan a costar más que sus consecuencias.

La dotación de Mantenimiento para satisfacer acciones reactivas es función de la demanda correctiva, evaluada técnica y económicamente.

---

1 Ver "Hipótesis del Contexto", Apartado 1.1.1, Capítulo 1.

6.3 Mantenimiento Restaurativo (Acción Reactiva Programada)

El Mantenimiento Restaurativo, conocido como Mantenimiento de Restauración Programada (MRP), concibe intervenciones controladas en función del resultado obtenido luego de aplicar otras rutinas Pro-activas.

Habiéndose detectado un desvío en algún parámetro sensible como alta vibración, elevada temperatura, ruido excesivo, aceite contaminado, etc., se programa una acción restaurativa que vuelve el sistema a su estado de condición básica original. Dependiendo de la magnitud del desvío, habrá mayor o menor tiempo para programar las tareas.

Los disparadores habituales del Mantenimiento Restaurativo son:

√ Rutinas de Inspección Estáticas o Dinámicas
√ Rutas de Lubricación
√ Chequeos de recorrida zonal
√ Defectos detectados durante la operación normal de la máquina
√ Inspecciones basadas en condición (predictivas / proactivas)
√ Búsqueda de fallos ocultos[1]
√ Cualquier otra intervención pro-activa de mantenimiento

Por ejemplo, aunque una anomalía detectada con predictivo o detectivo aún no haya dejado fuera de servicio el sistema (falla funcional), es preciso eliminarla con premura programando acciones de restauración. Nótese que estas tareas pueden programarse y planificarse, a diferencia del mantenimiento correctivo en el que únicamente es posible una planificación.

Una situación especial se presenta cuando se detectan fallos ocultos a consecuencia de aplicar Mantenimiento Detectivo en elementos **redundantes** o de **protección**[2]. Los sistemas que cuentan con este tipo de configuración se caracterizan por alcanzar altas confiabilidades. Si sobre los elementos redundantes o de protección se identifican fallas, el sistema protegido queda sin protección con el consecuente riesgo de falla simultánea. Por tal motivo, la restauración programa sobre los elementos protectores, debe planificarse muy cuidadosamente tomando ciertas precauciones. Las precauciones pueden ser múltiples y, en general, se opta por detener el sistema protegido (con programación controlada) o disponer de una protección alternativa *provisoria* hasta que el elemento protector original haya sido restaurado totalmente.

Es imposible listar todas las posibles tareas que se hacen con Mantenimiento Restaurativo. Pueden ir desde el simple cambio de un interruptor, hasta la sustitución de un cojinete del eje de una turbina generadora de energía eléctrica. El departamento de mantenimiento debe dar respuesta a este tipo de anomalías a través de una adecuada programación y planificación de los recursos. Algunos trabajos de restauración pueden requerir la participación de personal especializado externo a la compañía, en cuyo caso la planificación debe coordinar, también, tales acciones.

Al igual que en Mantenimiento Correctivo, es importante considerar el tiempo destinado para tareas de verificación y prueba de funcionamiento.

---

1 Una Acción típica de Mantenimiento Restaurativo es reparar elementos en stand-by (redundancias pasivas) que se detectaron con falla al implementar Mantenimiento Detectivo.

2 Ver "Dispositivos Redundantes y Dispositivos de Protección", Apartado 5.1.1, Capítulo 5.

6.4 Mantenimiento Mejorativo (Acción Reactiva Programada)

También conocido como *Mantenimiento Modificativo* o simplemente *Rediseño*, se basa en alterar ciertas condiciones originales de un equipo o configuración industrial para corregir errores de diseño que impiden alcanzar los estándares de producción solicitados.

Muchas veces con pequeñas modificaciones se mejoran parámetros intrínsecos del equipo como la confiabilidad y mantenibilidad, eliminando fallos crónicos (mejora física) u optimizando procedimientos de montaje / desmontaje de piezas (mejora operativa). De una u otra forma, el área de Mantenimiento suele involucrarse en trabajos que obligan a un rediseño (menor o mayor) sobre los activos fijos.

6.4.1 Objetivos

Los objetivos más comunes del Mantenimiento Mejorativo son:

- √ Aumentar la capacidad nominal o prestación deseada de un equipo o sistema productivo.
- √ Aumentar la confiabilidad original y, por ende, la disponibilidad.
- √ Dotar a los equipos de mayor seguridad inherente durante la operación.
- √ Disminuir tiempos de reparación (T_R) o diagnóstico (T_D) para mejorar la mantenibilidad.
- √ Eliminar fallos crónicos (recurrentes) que merman la confiabilidad e incrementen el riesgo de accidentes o contaminación del medio ambiente.
- √ Adecuar las instalaciones a nuevas condiciones operativas de performance y rendimiento.
- √ Eliminar condiciones inseguras, fuentes de contaminación, lugares de difícil acceso o elementos redundantes innecesarios que pongan en riesgo la operación.
- √ Disminuir la frecuencia en intervenciones preventivas periódicas, con la baja consecuente del costo integral de mantenimiento.
- √ Reducir el gasto en piezas de recambio adaptando la instalación a otras de menor costo.
- √ Disminuir la probabilidad de falla por error de montaje (mortalidad infantil) proveyendo al sistema de configuraciones poka-yoke.
- √ Optimizar procesos y estándares de operación, mantenimiento o calidad.

Nota: Para mejor comprensión del lector, cabe destacar que la metodología de análisis RCM considera al mantenimiento mejorativo como **Rediseño**, por su parte el TPM lo define como **Mantenimiento Correctivo**. Aquí, y siendo que en cualquier caso se trata de una mejora, nos inclinamos por denominarlo **Mantenimiento Mejorativo**.

Lo interesante del caso es preguntarse porqué razón casi siempre el departamento de mantenimiento es quien realiza este tipo de tareas. La repuesta la proporciona muy claramente el Dr. Ing. Eduardo Manuel Cruz Rabelo en su obra *Ingeniería de Mantenimiento*.

El autor referencia en su página 122 lo siguiente, *"Si las máquinas se produjeran con niveles elevadísimos de fiabilidad...., muchos requisitos estarían satisfechos automáticamente sin necesidad del esfuerzo de Mantenimiento. Sin embargo, estas máquinas serían sumamente costosas para estas condiciones....."*.

Un factor adicional al concepto anterior lo aporta la experiencia del explotador del equipo. La experiencia y trayectoria del fabricante son vitales para el diseño de nuevas máquinas; sin embargo, el beneficio marginal en confiabilidad generalmente lo aporta el explotador debido a su capacidad de operación en el contexto operativo. En pocas ocasiones el fabricante de una máquina convencional posee los mismos conocimientos que el explotador, en cuanto al contexto en el que ésta se desempeña[1].

---

1 Este concepto alcanza aún más validez en equipos que se reparan cuando fallan.

6.4.2 Una particularidad, el Mantenimiento Curativo

Ciertos modelos de organización separan las acciones reactivas de Mantenimiento Mejorativo efectuadas en la propia Planta, de aquellas promovidas por los fabricantes de los equipo y que denominan **Mantenimiento Curativo**.

Como adelantáramos en el Capítulo 1, algunos fabricantes de máquinas importantes están seriamente comprometidos con las consecuencias que éstas puedan provocar en la seguridad o en el medio ambiente. Adoptan, entonces, una actitud pro-activa frente a las fallas sucedidas durante la operación de los bienes por ellos diseñados y fabricados (fundamentalmente durante el funcionamiento de las primeras unidades).

Se hacen análisis estadísticos e investigaciones exhaustivas (ADF's) que culminan, muchas veces, con la modificación o reemplazo de componentes con carácter *masivo y mandatorio*[1]. También puede solicitársele al explotador de la máquina el cambio obligatorio, parcial o total, de los planes y procedimientos de mantenimiento.

Por ejemplo, si durante el inicio de la operación se presenta alguna falla no prevista que afecta o podría afectar la seguridad de las personas o el medio ambiente, se dispara de inmediato un análisis de falla (ADF) para encontrar las causas raíz, determinar las acciones pertinentes y evitar su recurrencia.

Los convenios de garantía pueden obligar a compartir responsabilidades entre el fabricante y el operador, motivo por el cual el sostenimiento de dicha garantía sólo se logra con la acción conjunta fabricante – explotador.

Los objetivos del Mantenimiento Curativo se logran con alguna de las siguientes acciones:

√ Realizando modificaciones (inclusión, cambio o exclusión) en el Plan de Mantenimiento original. Puede suceder que el Plan de Mantenimiento inicial no haya considerado el modo de falla específico que causó la avería.

√ Rediseñando algún sistema, subsistema o componente, que elimine el modo de falla, reduzca sus posibilidades de ocurrencia o minimice sus consecuencias.

√ Reemplazando una pieza con defectos de fabricación. El fabricante deberá contar con un registro detallado de las unidades en las que se instaló la partida y cuyas piezas poseen el defecto. Puede requerirse el inmediato retiro del mercado de las unidades equipadas con la pieza defectuosa y el posterior reemplazo de las mismas.

---

1 Por acciones "mandatarias" se consideran aquellas que son de cumplimiento obligatorio. Un ejemplo lo constituyen las recomendaciones surgidas como consecuencia de la investigación y estudio de accidentes aéreos.

Resumen de aplicación

6.1 Introducción

- *Una acción reactiva consiste en actuar cuando, naturalmente y en condiciones normales de operación, se ha descubierto un estado de funcionamiento no deseado.*

- *El Mantenimiento Correctivo se define como no programado porque el momento de su ejecución es tan aleatorio como la aparición de la falla que pretende corregir; no obstante lo cual, puede ser objeto de Planificación.*

- *El Mantenimiento Restaurativo y el Mantenimiento Mejorativo son acciones Programadas porque la detención de la máquina puede programarse. La programación es válida a partir de la identificación de un desvío, falla sintomática o anomalía, como resultado de aplicar otro tipo de mantenimiento (proactivo, predictivo, preventivo o detectivo).*

- *Es apropiado contar con un sistema de gestión capaz de atender y satisfacer las necesidades de reparar fallas imprevistas o desvíos.*

6.1.1 Evolución histórica

- *En el pasado las personas encargadas de operar la máquina también la restauraban o reparaban.*

- *Con la revolución industrial, el crecimiento económico y el aumento de la complejidad técnica, se hizo imprescindible la especialización. Por ello, se produjo una subdivisión del trabajo en todas las actividades que distribuyó ordenadamente las tareas en mantenimiento y producción.*

6.1.2 Conveniencia técnico-económica

- *No siempre trae el máximo provecho integral evitar que sucedan todas las fallas, sobre todo cuando éstas no tienen consecuencias para la seguridad, el medio ambiente, la producción o la integridad de los activos fijos relevantes.*

6.2 Mantenimiento Correctivo (Acción Reactiva No Programada)

- *El Mantenimiento Correctivo repara las fallas funcionales tras su ocurrencia.*

- *No toda rotura imprevista de un mecanismo, elemento o equipo debe tratarse como emergencia.*

- *El Mantenimiento Correctivo es una tarea No Programada que se lleva a cabo en forma inmediata a la falla funcional para restablecer el funcionamiento de la máquina.*

- *La velocidad con que debe solucionarse una falla, dependerá de las consecuencias que ésta produzca en el negocio (seguridad, medio ambiente, proceso productivo o activos fijos).*

- *Es imposible eliminar el Mantenimiento Correctivo totalmente, siempre habrá averías impredecibles que requieran de una rápida solución.*

6.2.1 Gestión del Mantenimiento Correctivo

- *Gestionar el Mantenimiento Correctivo significa:*

  - *Dotar al personal con capacidad suficiente para diagnosticar fallas y efectuar reparaciones en tiempo y forma.*
  - *Contar con procedimientos y hojas de trabajo de fácil entendimiento.*
  - *Realizar una adecuada planificación de acuerdo a la envergadura de las tareas.*
  - *Plantear objetivos que reduzcan el tiempo de reparación (T_R).*
  - *No descuidar el riesgo de accidentes durante la ejecución de los trabajos.*
  - *Reducir el MTTR optimizando sistemas y procedimientos.*
  - *No consumir más repuestos ni insumos que los necesarios.*
  - *Optimizar el uso de mano de obra con planificación.*
  - *Reparar definitivamente los fallos para reducir la recurrencia.*

6.2.2 Planificación del Mantenimiento Correctivo

- *El tiempo total correctivo (T_{TC}) se compone del tiempo de diagnóstico (T_D) y el tiempo ocupado en la reparación (T_R). Un activo cuyo tiempo de diagnóstico y reparación es bajo, permite ser reparado en menos tiempo.*

- *El tiempo de diagnóstico (T_D) es el tiempo que insumen los especialistas de mantenimiento en determinar qué ha sucedido en la máquina y cómo lograr una rápida solución.*

- *El tiempo de reparación (T_R) es aquel destinado a solucionar el problema completamente y lograr que el sistema quede en condición productiva.*

- *El tiempo de planificación (T_P) se incluye dentro del tiempo de reparación (T_R).*

- *Una correcta planificación del Mantenimiento Correctivo debe:*

  - *Definir el alcance de los trabajos en base al diagnóstico establecido.*
  - *Reunir o elaborar los procedimientos y hojas de trabajo.*
  - *Seleccionar herramientas, repuestos y materiales de consumo.*
  - *Definir el personal afectado a cada tarea por especialidad. Planificar turnos, grupos de trabajo, refrigerios, descansos y secuencia de las tareas y subtareas.*
  - *Reunir todas las tarjetas de seguridad (TS), órdenes de trabajo (OT), hojas de trabajo (HT), instructivos de puesta en marcha y operación (IPM), etc.*
  - *Reconocer los estándares de aceptación para la entrada en servicio del equipo.*
  - *Establecer las rutinas de prueba, puesta en marcha y verificación de funcionamiento.*
  - *Confeccionar un diagrama de Gantt si la envergadura del trabajo lo justifica.*

- *Un conjunto de tareas que requiera planificación mostrará mayor costo inicial pero, seguramente, el costo total integral será menor. Contrariamente, las tareas denominadas no planificables costarán menos aún sin planificación.*

- *El tiempo de ejecución (T_E) es aquel destinado exclusivamente a la reparación. Depende de la experiencia y capacidad técnica del personal, así como del grado de planificación alcanzado y la mantenibilidad del activo.*

- *El tiempo de verificación (T_V) incluye tareas destinadas a comprobar que el sistema quedó efectivamente reparado y es capaz de alcanzar el régimen nominal de operación.*

- *Es muy importante contar con estándares para trabajos repetitivos de mantenimiento correctivo que disminuyan el T_R pero, por sobre todas las cosas, que eviten equivocaciones y bajen el riesgo de accidente.*

- *Tipificar los Procedimientos de Reparación más importantes ayuda a gestionar y planificar el Mantenimiento Correctivo. Cada trabajo se disgrega en subtareas secuenciales que describen el orden de ejecución y las precauciones a tener en cuenta.*

6.2.3 Criterios de Prioridad

- *Siempre es necesario un marco de prioridades objetivo que permita asignar correctamente los recursos y balancear la demanda reactiva con la pro-activa.*

- *El departamento de mantenimiento debe cumplir con un volumen pro-activo tal que garantice la continuidad operativa a mediano y largo plazo pero, también, debe atender las necesidades surgidas imprevistamente.*

- *Cada compañía debe escoger el criterio de prioridades que más se ajuste a las necesidades de todos sus actores.*

- *El ranking de prioridades adoptado deberá permitir la ubicación de cada avería en la categoría adecuada sin magnificar la urgencia ni la importancia. Ver Tabla 6.2.1.*

- *Cualquier sistema de comunicación empleado (teléfono, radio, mail o sistema de gestión informático) debe incluir en el Aviso de Trabajo o Pedido, el correspondiente nivel de prioridad.*

6.2.4 Ventajas y Desventajas del Mantenimiento Correctivo

Ventajas
- *Por lo general requiere poca planificación, excepto en trabajos de larga duración.*
- *Si la consecuencia de la falla es controlada, se aprovecha al máximo la vida de los elementos.*
- *Se evitan grandes gastos preventivos y predictivos si la decisión de aplicar correctivo fue producto de un análisis costo-beneficio.*
- *Si la intervención es adecuada, se restituye rápidamente la operación del equipo.*

Desventajas
- *En intervenciones correctivas no controladas puede afectarse la disponibilidad de Planta deteniendo la producción y generando grandes pérdidas en cantidad y calidad.*
- *Se incrementa el riesgo de accidentes, suele actuarse de forma acelerada y caótica.*
- *Peligro de no contar con suficiente dotación al momento de suceder la avería.*
- *Posible incremento del plantel permanente, con aumento indiscriminado de gastos fijos.*
- *No siempre el personal que repara la avería conoce en profundidad la instalación o no cuenta con la información técnica suficiente.*
- *En ocasiones se improvisan soluciones que alteran el diseño original.*
- *Pérdida de información valiosa para establecer las causas que produjeron la avería.*
- *Se dificulta proyectar los gastos de mantenimiento y confeccionar presupuestos.*

- *La dotación de mantenimiento para satisfacer acciones reactivas es función de la demanda correctiva evaluada técnica y económicamente.*

6.3 Mantenimiento Restaurativo (Acción Reactiva Programada)

- *El Mantenimiento Restaurativo concibe intervenciones controladas en función del resultado obtenido de aplicar otras rutinas Pro-activas.*

- *La restauración programa sobre los elementos protectores debe planificarse muy cuidadosamente tomando ciertas precauciones. Las precauciones pueden ser múltiples y, en general, se opta por detener el sistema protegido (con programación controlada), o disponer una protección alternativa provisoria hasta que el elemento protector original haya sido restaurado totalmente.*

6.4 Mantenimiento Mejorativo (Acción Reactiva Programada)

- *Se basa en alterar ciertas condiciones originales de un equipo o configuración industrial para corregir errores de diseño que impiden alcanzar los estándares de producción solicitados.*

6.4.1 Objetivos

- *Aumentar la capacidad nominal de un equipo o sistema productivo.*
- *Aumentar la confiabilidad original y, por ende, la disponibilidad.*
- *Dotar a los equipos de mayor seguridad inherente durante la operación.*
- *Disminuir los tiempos de reparación (T_R) o diagnóstico (T_D).*
- *Eliminar los fallos crónicos (recurrentes) que merman la confiabilidad e incrementan el riesgo de accidentes o contaminación del medio ambiente.*
- *Adecuar las instalaciones a nuevas condiciones operativas de performance.*
- *Eliminar condiciones inseguras, fuentes de contaminación, lugares de difícil acceso o elementos redundantes innecesarios que pongan en riesgo la operación.*
- *Disminuir la frecuencia en intervenciones preventivas periódicas.*
- *Reducir el gasto en piezas de recambio adaptando la instalación a otras de menor costo.*
- *Disminuir la probabilidad de falla por error de montaje (mortalidad infantil).*
- *Optimizar procesos y estándares de operación, mantenimiento o calidad.*

- *La experiencia y trayectoria del fabricante son vitales para el diseño de nuevas máquinas; sin embargo, el beneficio marginal en confiabilidad generalmente lo aporta el explotador debido a su experiencia en la operación (conocimiento del contexto operativo).*

6.4.2 Una particularidad, el Mantenimiento Curativo

- *El Mantenimiento Curativo consiste en modificar o reemplazar componentes con carácter masivo y mandatorio, luego de realizar análisis estadísticos e investigaciones exhaustivas (ADF's). En estos casos, el fabricante le exige al explotar el cambio total o parcial del Plan de Mantenimiento.*

- *Algunos fabricantes de máquinas están seriamente comprometidos con las consecuencias que éstas puedan provocar en la seguridad o en el medio ambiente. Adoptan, entonces, una actitud pro-activa frente a las fallas, fundamentalmente durante el funcionamiento de las primeras unidades. Los análisis de falla (ADF) deben encontrar la causa raíz y determinar las acciones pertinentes que eviten la recurrencia.*

- *Los objetivos del Mantenimiento Curativo pueden alcanzarse con algunas de las siguientes acciones.*

  - *Realizando modificaciones (inclusión, cambio o exclusión) en el Plan de Mantenimiento original.*
  - *Rediseñando algún sistema, subsistema o componente, que elimine el modo de falla, reduzca sus posibilidades de ocurrencia o minimice sus consecuencias.*
  - *Reemplazando una pieza con defectos de fabricación.*

Capítulo 7

Procesos y Metodologías para mejorar el Mantenimiento

... Uno juega mejor con sus amigos. Ellos serán generosos, lo ayudarán, lo comprenderán, lo alentarán y lo perdonarán. Un equipo de hombres que se respetan y se quieren es invencible. Y si no lo es, más vale compartir la derrota con los amigos, que la victoria con los extraños o los indeseables[1].

---

1 De Alejandro Dolina, Crónicas del Ángel Gris - Instrucciones para elegir en un picado - página 193..

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Conocer las principales herramientas utilizadas para mejorar el Proceso Mantenimiento.
- √ Entender el criterio sobre el que se basa cada una, para mejorar la disponibilidad de los activos y reducir los costos de mantenimiento.
- √ Seleccionar la metodología de administración más eficaz para cada problemática.
- √ Participar en el diseño y optimización de planes de mantenimiento.
- √ Formar parte de grupos de trabajo orientados a mejorar el Proceso Mantenimiento.
- √ Liderar planes de mejora y participar en la investigación y eliminación de causas de fallas.

Índice de Contenidos

7.1 Introducción
- Nuevos Criterios
- Documentación Técnica
- Prueba y Error
- Aplicar correctamente la tecnología correcta

7.2 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)
- Reseña Histórica
- Beneficios y Alcance de un Análisis RCM
- Metodología de Trabajo
- Pasos de un Análisis RCM
- Reuniones de Trabajo
- Ventajas y Desventajas del RCM

7.3 Técnicas de ayuda para el Análisis de Fallas
- Principio de Pareto
- Tormenta de Ideas (Brainstorming)
- Técnica del Por qué – Por qué
- Diagrama Causa – Efecto (Diagrama de Ishikawa)
- Técnica de las 5W + 1H y el Análisis de Fallas (ADF's)
- Análisis P-M (Physical Mechanism)
- Análisis Causa – Raiz de Falla (RCA)
- Árbol de Fallos
- Árbol de Eventos

7.4 Mantenimiento Productivo Total (TPM)
- Objetivos del TPM
- Beneficios esperados de su aplicación
- Proceso de Implementación
- Pilares TPM
- Relación entre Pilares
- Consolidación del TPM
- Pérdidas y Productividad Total de Equipo
- Ventajas y Desventajas del TPM
- Aplicación simultánea e integrada de TPM y RCM

7.5 Herramientas de Mejora
- Metodología Six Sigma
- El Benchmarking

Resumen de aplicación

Anexos Relacionados
- Anexo VI: Guía Práctica para estimar Criticidades
- Anexo VII: Planilla tipo para Análisis de Fallas (ADF's)
- Anexo VIII: Ejemplo de OPL (One Point Lesson)
- Anexo IX: Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC – Life Cycle Costo)
- Anexo X: Análisis de Tiempos Productivos
- Anexo XI: Estratégia de las 5S (Housekeeping)

7.1 Introducción

Cualquier actividad industrial está sujeta a cambios y mejoras permanentes. Cada vez más, nuevos métodos hacen su aporte para optimizar los procesos de gestión. El Mantenimiento, como especialidad del ámbito industrial, no está exento de tal evolución. En este Capítulo se analizan algunas metodologías y herramientas utilizadas para optimizar la performance del Mantenimiento y de la organización toda.

Presentamos en primer lugar al RCM (Reliability Centred Maintenance) que, siendo un proceso de decisión estructurado, es ideal para definir el plan de mantenimiento más eficaz y eficiente de cualquier equipo. Fue desarrollado para resolver problemas de confiabilidad en equipos cuya disponibilidad requerida era alta.

En la sección 7.3 se describen algunas técnicas útiles para dar soporte al RCM y a otras metodologías como el RCA (Root Cause Analysis) y el TPM (Total Productive Maintenance). Algunas de ellas, incluso, pueden combinarse para, aplicadas simultáneamente, constituir un paquete de medidas que potencian los análisis y diagnósticos de averías. Se presta especial interés al tratamiento de fallas crónicas y fallas esporádicas; el lector verá que ciertas técnicas son más efectivas para resolver y eliminar las primeras, mientras que otras, hacen lo propio con las denominadas fallas esporádicas.

En la sección 7.4 se analizan y destacan los puntos más sobresalientes de la metodología de gestión total de activos llamada TPM. Su alcance integrador adquiere tal magnitud que requiere la participación de todos los miembros de la empresa. Dentro de sus objetivos se encuentra la búsqueda de las *cero pérdidas* como visión corporativa.

Finalmente, es la sección 7.5, se describen brevemente algunas técnicas de mejora globales como el Six-Sigma y el Benchmarking.

Aún en la actualidad una gran cantidad de recursos, no siempre bien cuantificados, se destinan únicamente para corregir fallas imprevistas; es decir, para resolver emergencias. En la jerga del Mantenimiento esto se conoce como "apagar incendios". Las preguntas de rigor que aparecen como obvias son: *¿Cuál es la razón por la que habiendo tantas nuevas metodologías de mejora y predicción, siguen teniendo tanto protagonismo las acciones reactivas? ¿Por qué en muchos ámbitos industriales todavía no está arraigada la cultura de la prevención como filosofía de trabajo? ¿Por qué tenemos mayor tendencia a ser Reactivos que Proactivos?*

Responder a estas preguntas no es sencillo siendo que, muy seguramente, las razones se relacionan con la propia esencia de ser humano y con los valores culturales de la sociedad. En los siguientes puntos ensayamos, al menos, algunas posibles respuestas.

7.1.1 Nuevos Criterios

Hay un concepto importante que merece una mención especial antes de desarrollar cada metodología: la figura del *héroe - individual.*

En occidente es común premiar, valorar o emular las acciones de los *héroes.* En el ámbito industrial un héroe es aquel que nos salva de los problemas o resuelve una *falla grave* en corto tiempo. Generalmente estas personas poseen gran experiencia y conocimientos técnicos, y están hace tiempo al frente de sus puestos y funciones. Además, tienen a cargo gran cantidad de personas y poseen un fluido contacto con proveedores y empresas de servicios. Son personas que se sienten cómodas con tal situación y su papel en la empresa es protagónico dado que algunos de estos atributos son, por cierto, muy valiosos.

Aún inconscientemente, cierto nivel de caos (obviamente no exagerado) permite al héroe sobresalir. Sin sobresaltos ni emergencias, el héroe pierde protagonismo y el trabajo en equipo escapa a su capacidad de liderazgo. Pareciera que *la prevención condenara al anonimato.*

Es desde este punto de vista que muchas personas lamentablemente consideran todavía que para ser útiles a la compañía sólo es suficiente con *salvarla* cuando suceden las fallas. Pero pocas veces se tiene en cuenta que una reparación de emergencia requiere recursos adicionales de los que serían necesarios para prevenir la falla. Se instala, así, un círculo vicioso que se retroalimenta hasta llevar a las empresas al caos absoluto y, en algunos casos, incluso a la quiebra.

Afortunadamente en la actualidad hay nuevos criterios, y se está cambiando la forma de pensar y entender la función del mantenimiento. Ya no existe tanta devoción por la figura del *héroe reparador e individual*, y comienza a ser más valorado el trabajo en equipo y la prevención por sobre la reacción.

Es preciso destacar, entonces, la figura del *mantenedor* como profesional capaz no sólo de reparar las fallas sino también de prevenirlas. El mantenedor recurre a la reparación de averías si no se pudieron evitar o si es más conveniente corregirlas que evitarlas[1]. Si buena parte de las fallas no pueden evitarse (no se tiene control sobre los modos de falla), la Planta en lugar de operar está siendo reparada casi constantemente. La solución no es, al menos en principio, aumentar los recursos; deben aprovecharse al máximo mejorando la política de mantenimiento.

Los Gerentes y Jefes que lidian con estos paradigmas a diario tienen que romper estas barreras aprovechando al máximo sus recursos. Es necesario un profundo compromiso y una reconversión de los procesos internos de la función Mantenimiento. Para alcanzar altos estándares de utilización de activos (disponibilidad) deben aplicarse herramientas de gestión como las que proponemos más adelante, no obstante el lector podrá obtener en el mercado muchas más.

7.1.2 Documentación Técnica

Otra consideración importante es la dificultad que tienen los responsables de mantenimiento en contar con información técnica sólida. Algunos proyectos de ingeniería de nuevas instalaciones son verdaderamente incompletos. La información suministrada por fabricantes y proveedores es escasa o de bajo nivel técnico, lo que obliga a improvisar procedimientos y a interpretar estándares de funcionamiento de forma particular. Por tal motivo, hay dos funciones del área Ingeniería de Mantenimiento que son fundamentales (ver sección 8.2.4 "Gestión de la Información y Manejo del Cambio", Capítulo 8):

√ **Gestión de la Información**. Deben disponerse todos los recursos necesarios (personal, instalaciones y métodos) para clasificar y ordenar - y mantener en dicho estado - toda la información referida a los ítems mantenibles de Planta. Deben existir procedimientos para clasificar, almacenar y localizar rápidamente la información.

√ **Manejo del Cambio**. Como se dijo, en la industria ocurren cambios o alteraciones al diseño original de manera casi permanente. Estos cambios pueden estar relacionados con aspectos técnicos del equipo o con procedimientos de operación y mantenimiento. Cualquiera sea el caso, toda alteración debe verse reflejada inmediatamente en aquellos registros o procesos de la organización que guarden alguna relación. Téngase en cuenta que cualquier cambio, aún el menor, muy posiblemente obligue a efectuar modificaciones en los datos técnicos del equipos, en los registros del historial, en los procedimientos e instructivos de calidad y medio ambiente (por ejemplo ISO 9000 y 14000), en los análisis de riego (por ejemplo HAZOP), en los estudios de políticas de mantenimiento (por ejemplo RCM), en los Lay-out de Planta, en los P&ID de la instalación, en los manuales de operación, en las fichas de producto, etc. Debe existir, entonces, un área responsable de coordinar y asegurar que todas estas modificaciones se lleven a cabo.

Si estas funciones se cumplen satisfactoriamente, el personal técnico podrá conocer en detalle la situación real de cada activo en todo momento.

7.1.3 Prueba y Error

La presión para lograr objetivos en el corto plazo y fundamentalmente la falta de conocimientos sobre métodos de optimización e investigación de fallas, es la causa de que con frecuencia se recurra a las pruebas reiteradas (prueba y error) para solucionar problemas. Esta ausencia de racionalidad también obedece a falencias en la *Gestión de la Información* ya puntualizada en la sección anterior.

---

1 Ver Sección 7.2 "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)".

Sumado a esto, encontramos la tendencia natural de mucha gente en inclinarse al rediseño como primera medida preventiva. Si bien un rediseño puede minimizar, e incluso evitar, que suceda un modo de falla, también puede incorporar muchos otros. El rediseño constituye una acción válida solamente cuando fueron agotadas todas las instancias previas ofrecidas por el Mantenimiento Pro-activo, porque la mayor parte de los modos de falla seguirán ocurriendo si el mecanismo de falla no está debidamente controlado.

Además, algunos equipos comienzan a funcionar sin un plan formal de mantenimiento. Los responsables de diseñar los planes de mantenimiento copian o replican planes de equipos similares sin demasiado análisis, ignorando el contexto operativo y asumiendo que el proveedor es el más indicado para sugerirnos la estrategia. Conforme aparecen las fallas se proponen rutinas o inspecciones preventivas, aunque tampoco con gran profundidad de criterio.

En el mejor de los casos esta práctica culmina con planes de mantenimiento que evitan los modos de falla que han sucedido; sin embargo, la organización permanece desprotegida de aquellos que, no habiendo ocurrido aún, tienen cierta posibilidad de hacerlo. Si, además, alguno de estos puede tener consecuencias graves, entonces el riesgo asumido es mayor del que se cree.

7.1.4 Aplicar correctamente la tecnología correcta

Todavía existe cierta desconfianza sobre los beneficios que pueden aportar algunos métodos de gestión o algunas tecnologías de predicción. El descrédito se debe al desconocimiento o al hecho de haber transitado una mala experiencia. Mantenimiento es responsable por escoger la herramienta correcta para cada situación y aprovechar de ella los máximos beneficios.

Por ejemplo, en los últimos tiempos se han hacho importantes avances en técnicas predictivas. Aún así, siempre hay que evaluar cada tecnología cuidadosamente para conocer sus ventajas y limitaciones; vale decir, saber qué podemos esperar de su aplicación y qué no. El Ingeniero de Mantenimiento es un profesional que debe informar y divulgar la realidad de cada técnica y evitar falsas expectativas. No hay método ni tecnología que por sí sola evite o prediga **todos** los modos de falla de un equipo. Sólo una combinación apropiada y balanceada puede satisfacer las necesidades de confiabilidad.

Aplicar correctamente la tecnología correcta es un desafío y requiere estudio, dedicación y experiencia. En la gestión de activos físicos, no siempre es mejor hacer *mucho*, hay que hacer lo justo en el momento justo. Los intervalos entre inspecciones deben estimarse con seriedad y, en ciertos casos, hasta científicamente.

La Gerencia debe apoyar y comprometerse firmemente con el uso de nuevos métodos de administración aunque éstos inicialmente no arrojen los resultados esperados. Todo método o proceso requiere asentamiento y la consolidación se logra únicamente luego de cosechar la propia experiencia.

Una estrategia de mantenimiento es aquella que nos dice qué tareas hacer, con quién y a qué frecuencia. En muchas empresas todavía hay planes de mantenimiento que contienen tareas innecesarias o, al menos, poco efectivas para eliminar modos de falla. Si una organización tiene tan sólo un 20% de tareas innecesarias está utilizando gran parte de sus recursos de manera ineficiente. Si, además, omite realizar, al menos, un 20% de tareas que podrían minimizar las consecuencias de los modos de falla que le suceden, resulta claro que existe un gran margen para la mejora y la racionalización.

7.2 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

El RCM (Reliability Centred Maintenance) es un método estructurado, deductivo y participativo que define la estrategia de mantenimiento más apropiada para cada equipo actuando en su contexto operativo real. Una *estrategia apropiada* es un conjunto de tareas capaz de evitar que sucedan modos de falla o reducir drásticamente sus consecuencias de manera eficiente. Esta técnica establece cuándo una tarea es posible desde el punto de vista técnico y cuándo es económicamente viable para un horizonte de validez definido. La eficacia y eficiencia de los planes de mantenimiento de cualquier máquina, pueden mejorar significativamente con esta herramienta de decisión.

Sin embargo, el RCM no busca únicamente resolver problemas de confiabilidad, va más allá de ello e introduce un cambio cultural respecto a los conceptos a tener en cuenta al momento de *pensar* en Mantenimiento. Sobre todo introduce la idea, hoy entendida por la mayoría, que el Mantenimiento tiene como finalidad asegurar que las *funciones* de los equipos se sostengan en el tiempo. De modo que es poco válido concentrarse únicamente en el equipo como objeto aislado, sin detenerse a evaluar sus funciones (las razones por las que se instala) dentro del contexto operativo. Son las **funciones** de la máquina lo que interesa en RCM.

Otro aspecto importante es que aunque las empresas cuenten con personal altamente capacitado para resolver problemas, carecen de práctica para aplicar herramientas que puedan integrar los conocimientos dispersos en las mentes de los colaboradores. Sólo una integración verdadera del conocimiento puede reducir el riego de falla y los gastos de mantenimiento.

Este proceso de análisis convoca (formando grupos de trabajo) a los técnicos y operadores que más conocen el equipo analizado y aprovecha de ellos su experiencia. Su participación conjunta permite plantear hipótesis válidas sobre los mecanismos progresivos de falla. El RCM aúna y consolida el saber de la gente. Hacer RCM, e implementar sus recomendaciones, es alinear al mantenimiento con las metas del negocio.

Anthony Smith define al RCM como: *Una filosofía de gestión del mantenimiento, en la cuál un grupo multidisciplinario de trabajo, se encarga de optimizar la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento, en función de la criticidad de los activos pertenecientes a dicho sistema.*

Por su parte, John M. Moubray dice: *Reliability-Centred Maintenance es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual*[1].

Con las definiciones anteriores queda claro que se trata de un proceso sistémico de análisis cuya finalidad es desarrollar las bases técnicas del mantenimiento que orienten los esfuerzos en aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los sistemas productivos y, por ende, la seguridad del negocio. El RCM prioriza el análisis para aquellos modos de falla cuyas consecuencias pueden afectar la seguridad de las personas o el medio ambiente. Hay un tratamiento especial para estos casos, y se proponen alternativas que reducen el riesgo de accidente y aseguran un desarrollo sustentable. Es un proceso de mejora de carácter *pro-activo*, porque no es preciso que sucedan las fallas para empezar a prevenirlas.

7.2.1 Reseña Histórica

La metodología RCM surge como una adaptación a la industria, desde el ámbito aeronáutico. Durante la década de 1960 los operadores aéreos sumaron esfuerzos para reducir los costos en mantenimiento de las flotas pero principalmente para reducir el riesgo de accidentes que, por entonces, era mayor que el actual. Esto motivó la creación de grupos de análisis y mejora conocidos como MSG (*Maintenance Steering Group*) integrados por personal altamente calificado (operadores, mantenedores y proveedores aeronáuticos). El resultado reveló una gran carga de mantenimiento preventivo, aunque sólo unos pocos componentes obedecían al patrón de fallas de la curva de la bañera.

Sin embargo, los primeros antecedentes filosóficos datan de un documento publicado en 1978 por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y escrito por F. S. Nowlan y H. F. Heap. A través de los años estas ideas innovadoras se fueron mejorando y adaptando a distintas aplicaciones hasta convertirse en lo que hoy se conoce como RCM. Los resultados fueron tan alentadores que actualmente se aplica con éxito en sectores tales como la industria nuclear, militar, petróleo, transporte, minería, manufactura, servicios, etc.

---

1 Uno de los impulsores más reconocidos de la metodología fue John Mitchell Moubray (1924-2004) quien publicó su conocido libro RCMII, en cuya página 7 se encuentra la definición citada.

En lo que respecta al sector aeronáutico, el método culminó con el documento MSG-3 publicado en 1980 en Estados Unidos. Este documento es la base científica para establecer los programas de mantenimiento programado de los nuevos aviones comerciales.

Un proceso sistemático de análisis y decisión puede llamarse RCM sólo si satisface las normas internacionales SAE JA1011 *"Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes"* y SAE JA1012 *"A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)"*. A lo largo de esta sección se hace referencia, en reiteradas oportunidades, a las citadas normas.

7.2.2 Beneficios y Alcance de un Análisis RCM

El paradigma fundamental del método es la conservación de las funciones del sistema. Veamos los beneficios adicionales que pueden esperarse de su aplicación.

7.2.2.1 Beneficios

- √ Establecer las rutinas de mantenimiento más efectivas para el activo buscando hacer exclusivamente lo necesario (un exceso de mantenimiento puede causar más daño del que pretende evitar).
- √ Reducir el riesgo de accidentes a niveles de tolerancia y satisfacer normativas, leyes o reglamentaciones vigentes referidas al cuidado del medio ambiente.
- √ Aumentar la disponibilidad y confiabilidad de las máquinas.
- √ Mejorar la calidad de los productos elaborados o de los servicios prestados.
- √ Preservar las funciones del sistema productivo teniendo en cuenta su contexto operativo. Disminuir el lucro cesante y reducir los gastos totales de operación (incluyendo los gastos de mantenimiento).
- √ Satisfacer a los usuarios (explotadores) del equipo o a los clientes del servicio.
- √ Promover el trabajo en equipo y el espíritu participativo de los colaboradores.
- √ Crear un lenguaje común en el ámbito del mantenimiento y de la Planta.
- √ Impulsar[1] rediseños para evitar o predecir aquellos modos de falla que pueden amenazar la seguridad de las personas, el medio ambiente, la producción o los activos físicos.

7.2.2.2 Alcance

Un proceso de decisión basado en RCM sirve para diseñar el plan de mantenimiento de una máquina nueva, o bien para mejorar el vigente de una existente. Puede aplicarse en cualquier tipo de equipos independientemente de su complejidad o tamaño. Algunos despliegues de RCM se han usado para definir la política de mantenimiento de equipos prioritarios; otros en cambio, se han aplicado en casi todas las instalaciones. La frontera para implementar RCM la fija la propia organización, dependiendo de su capacidad de gestión y de los recursos disponibles. No obstante, es imposible negar que ciertas máquinas (principalmente las prioritarias) brindan mayores retornos de inversión que otras menos importantes. Una táctica válida es hacer RCM en instalaciones que representan una *restricción* para la organización. Conforme se identifican las restricciones operativas, se hace RCM en los equipos que provocan pérdidas en los cuellos de botellas. Es una manera apropiada de combinar (TOC[2]) *Teoría de las Restricciones* con RCM. La aplicación de RCM en un equipo, línea o sistema productivo, puede complementarse con procesos de mejora ya existentes como TPM y RCA (ver sección 7.3.7).

Cualquiera sea el caso, la profundidad y los resultados dependerán de la capacidad y actitud de los talentos humanos que intervengan.

Un plan de mantenimiento surgido de RCM puede arrojar un conjunto de estrategias como: mantenimiento a condición (predictivo / proactivo), reacondicionamiento programado o cíclico (preventivo), reemplazo programado ó cíclico (preventivo), rutinas de limpieza, lubricación, calibración o ajuste (preventivo), búsqueda de fallos ocultos (detectivo), inspección operativa autónoma (IOA) e, incluso, ninguna acción pro-activa de mantenimiento programado (NAP) o, lo que es lo mismo, mantenimiento correctivo.

---

1 El equipo de revisión RCM debe limitarse a sugerir la modificación del sistema o del proceso, evitando resolver los aspectos técnicos del diseño durante las reuniones de trabajo. Esta tarea es responsabilidad de otros especialistas.

2 El creador de la Teoría de las Restricciones (TOC) es Eliyahu M. Goldratt quien dio a conocer inicialmente sus ideas a través de la famosa novela "La Meta".

7.2.3 Metodología de Trabajo

En función de lo visto en capítulos anteriores resultará sencillo entender la metodología RCM; sólo será necesario avanzar sobre aspectos metodológicos.

Además de las cuestiones netamente técnicas, el método impone ciertas reglas de trabajo sin las cuales se corre el riesgo de no lograr el máximo beneficio. Veamos, en primer lugar, la importancia que tienen los integrantes del grupo de trabajo.

7.2.3.1 Grupo de Trabajo y Facilitador

Para formar un grupo de análisis RCM se recurre a las personas que más conocen la máquina. Éstos pueden ser operadores, técnicos, supervisores de producción y mantenimiento, lubricadores, proveedores, especialistas en seguridad e higiene, etc. La experiencia y/o conocimiento de los analistas (integrantes del grupo) es esencial para el éxito del proceso. Es imprescindible contar con especialistas que conozcan técnicamente el equipo y, además, que sepan de RCM. Así, las respuestas a las preguntas formuladas conducirán a decisiones acertadas.

Es importante que los integrantes del grupo tengan un criterio de pensamiento amplio y una conducta expeditiva, tal vez más importante que su antigüedad. La cantidad de participantes **regulares** nunca debe superar las 6 ó 7 personas, aunque ocasionalmente pueden asistir a las reuniones proveedores u otros especialistas para tratar temas puntuales.

El equipo se reúne regularmente y es liderado por un Facilitador cuyo rol es clave. El facilitador debe estar altamente capacitado y experimentado en RCM (área metodológica), aunque también debe tener conocimiento tecnológico. Su función es asegurar el estricto cumplimiento de cada paso y lograr consenso entre los asistentes. No es necesario que conozca en profundidad la máquina porque puede inducir las respuestas que, en rigor, deben contestar las personas más cercanas al equipo. Muchas empresas prefieren, incluso, que el facilitador no conozca el sistema; consideran que sólo debe aportar el factor metodológico.

El facilitador prepara cada reunión y asegura que el lugar sea cómodo y que la información revisada en las reuniones anteriores se encuentre ordenada y volcada en las Hojas de Análisis o de Resultados, según corresponda (ver sección 7.2.5). Desde su rol de conductor, buscará el aporte de todos los participantes. Podrá haber personas más introvertidas que otras, en cuyo caso deberá influir para que todos se sientan con posibilidad de emitir su opinión libremente. Como moderador, debe evitar todo tipo de confrontación entre miembros del equipo.

Se considera apropiado que las reuniones duren 3 horas y no hacer más de 2 a la semana. Un análisis completo de RCM no debería insumir más de 25 reuniones. Superar dicho valor fatiga y crea una ansiedad contraproducente en los integrantes. Además, es un tiempo demasiado extenso para arribar a resultados tangibles. Si la complejidad del sistema hace presumir que serán necesarias más de 20/25 reuniones, es preferible subdividir la instalación y formar grupos independientes que analicen por separado cada uno de los subsistemas. La subdivisión puede ser *física* o *funcional*.

Como ejemplo, supóngase que la decisión es hacer RCM en un automóvil. Un único grupo podría demorar ciento de reuniones hasta terminar completamente toda la revisión. En este caso se aconseja una subdivisión *funcional* en la que los grupos trabajen independientemente sobre el sistema de frenos, suspensión, motorización, carrocería, etc. respectivamente.

Por el contrario, para el caso de una línea de envasado de bebidas, la subdivisión más apropiada podría ser *física*. Los grupos deberían analizar separadamente los distintos equipos que componen la línea: despaletizadora, lavadora, llenadora, pasteurizadora, etc.

Nota: No es recomendable que a las reuniones asistan regularmente Jefes o Gerentes de Mantenimiento, ni que hagan las veces de facilitador. El método no descarta la participación de estas personas, sino que su contribución es importante fuera de las reuniones. El facilitador, y si es necesario con ayuda de los miembros del grupo, presentará a los Jefes cada 4 ó 5 reuniones un resumen con el avance alcanzado para que éstos hagan las recomendaciones que consideren pertinente. Incluso, podrán solicitar que el equipo de trabajo esclarezca ciertos puntos en reuniones extraordinarias.

El facilitador debe buscar consenso con los Jefes, quienes finalmente validarán y aprobarán el trabajo. El plan de mantenimiento resultante se implementará en campo solamente después de la aprobación de los Jefes responsables, o quienes éstos designen para ese fin.

Figura 7.2.1 Estructura característica para un grupo de Análisis RCM.

Deben identificarse claramente los límites del sistema a estudiar para así coordinar la frontera del análisis con otros grupos de trabajo. Esta tarea la realizan los líderes del proyecto junto a los facilitadores respectivos.

Finalmente cabe mencionar la importancia de plantear indicadores para medir el avance y los resultados alcanzados.

7.2.3.2 Dónde comenzar los análisis RCM

Una vez capacitadas en RCM las personas que conformarán el grupo y elegido el facilitador, los líderes del proyecto deben diseñar un *Master Plan de Implementación* que incluya todas las máquinas (así como sus límites) sobre las cuales se aplicará la metodología; vale decir, elegir las llamadas *áreas de oportunidad.*

Existen varias formas de priorizar. Quizá la más directa y económica sea el *criterio natural.* Resulta difícil pensar que los responsables de una empresa no puedan identificar casi instintivamente los equipos que originan las mayores pérdidas, o que representan riesgo para la seguridad. Sin embargo, hay que tener cuidado porque la experiencia es válida para proponer hipótesis, pero no para corroborarlas.

Si fuese posible hacer una valoración económica (o de riesgo) de cada pérdida productiva referida a cada equipo, la priorización sería sencilla. Aplicando un diagrama de Pareto (sección 7.3.1) se puede escoger el conjunto de activos sobre los cuales es más conveniente hacer RCM y, a cuyo término, se resolvería la mayor parte de las pérdidas.

Otra alternativa es, a través de la *Teoría de las Restricciones*, identificar aquellas máquinas que más perjudican el proceso productivo y aplicar RCM rigurosamente.

Algunas organizaciones se valen de matrices de criticidad para evaluar sus activos[1]. Si este trabajo ya fue hecho, puede aprovecharse para seleccionar las máquinas a revisar. A su vez, en el Capítulo 5 (sección 5.2) se plantearon técnicas para identificar riesgo en instalaciones, tales como el HAZOP y las Evaluaciones Probabilísticas de Riesgo (EPR). Las recomendaciones de allí surgidas son una posible fuente para definir los activos a incluir en el Plan Maestro de Implementación RCM.

Hay empresas que aplican otro enfoque. Estudian funcionalmente el sistema completo (cadena productiva) y no las máquinas, lo que se conoce como un estudio desde arriba. Bajo esta idea, sólo definen inicialmente las *funciones primarias* (principales) del sistema desde un punto de vista productivo y luego analizan sus *fallas funcionales* (operativas) que harían que dichas funciones no se cumplan. La falla funcional es tomada como *la circunstancia (equipo) que provoca la pérdida de capacidad productiva* y

1 Ver Anexo VI "Guía Práctica para estimar Criticidad".

que se traduce en costos extraordinarios para la organización. De esta manera no tienen en cuenta, al menos en primera instancia, los modos de falla. Por último, e identificadas las fallas funcionales, determinan sobre qué equipos es conveniente hacer un RCM tradicional.

Cualquiera sea el estudio previo utilizado para cuantificar pérdidas o riesgos, servirá para confeccionar el Plan Maestro de Implementación. Considérese que el primer despliegue (Análisis Piloto) debe ser exitoso. La situación ideal es escoger el activo con mayores problemas y, además, seleccionar personas con gran capacidad técnica y actitud hacia el trabajo en equipo.

Nota: No es recomendable efectuar análisis RCM para un conjunto de equipos; por ejemplo, todos los ventiladores, todos compresores, etc. Ello implicaría aislar cada activo de su contexto operativo real o, lo que es lo mismo, ignorar su importancia. Hacer un estudio RCM sobre "las bombas", supone asumir que equipos aún idénticos puedan tener políticas de mantenimiento iguales.

Hay fabricantes (muy pocos) que proveen sus máquinas con el plan de mantenimiento basado en RCM. Esto no es de gran utilidad y la compañía que adquiere activos bajo estas circunstancias debe tomar la revisión entregada por el fabricante y **hacer** una evaluación rápida del contexto particular en el que operará su nuevo equipo. El grupo de RCM debe identificar las situaciones particulares de entorno y proponer las modificaciones al plan original propuesto por el fabricante. Esta práctica ahorra tiempo de análisis y se denomina *Validación de Contexto*[1].

7.2.3.3 Criterios de Éxito

En los párrafos siguientes se listan algunos criterios de éxito para tener en cuenta.

- √ Obtener apoyo y compromiso de la más alta Dirección.
- √ Desarrollar un Master Plan de Implementación RCM a cargo de un Coordinador General que contenga alcance (activos y sus límites), recursos, plazos, responsables, etc.
- √ Desarrollar facilitadores con capacidad de liderazgo, actitud proactiva y espíritu crítico; en lo posible sin ser Jefes de los demás integrantes. Los facilitadores bregarán para que el método se aplique en orden y con la profundidad suficiente.
- √ Mantener la disciplina en las reuniones de trabajo (máximo 3 horas - 2 veces x semana).
- √ Convocar personas sensatas, proactivas, expeditivas, críticas y no disociadoras. El equipo debe ser multidisciplinario y formado sólidamente en RCM.
- √ Hacer que la jefatura de mantenimiento evalúe los resultados y las recomendaciones que surjan del análisis al completar el RCM. Las etapas intermedias también son verificadas por los jefes y por la dirección de Planta.
- √ No sancionar los errores humanos (no intencionales). Se tomarán como una oportunidad de mejora, capacitación mediante.
- √ Considerar que el Contexto Operativo asumido por RCM no es el que **debería ser** (ideal), sino el que **es** (real).
- √ Transferir a personas más especializadas, aquellas situaciones no resueltas por el equipo de trabajo durante las reuniones. De todas maneras, algún miembro del equipo debe asumir la responsabilidad del tema para que se resuelva satisfactoriamente.
- √ Dar, a cualquier miembro de la organización, libre acceso a la base de datos que surja de los análisis RCM – Historial de Revisiones –; esto promueve el espíritu crítico y enriquece a todos.
- √ Implementar rápidamente el Plan de Mantenimiento surgido de aplicar la metodología.
- √ Impulsar una revisión del análisis RCM original cuando suceda cualquier modificación en el sistema (activo o entorno) - Mantenimiento Mejorativo –, y proponer los cambios necesarios en el plan inicial. Sin embargo, y aún no habiéndose producido ninguna alteración aparente ni en el activo ni en el contexto, impulsar de todas formas revisiones sistemáticas y regulares (lo habitual es hacer revisiones anuales).
- √ Utilizar indicadores para medir el avance de cada análisis RCM y el impacto en el negocio de las estrategias de mantenimiento implementadas.

---

1 Sólo es válido efectuar una Validación de Contexto si se tienen en cuenta TODOS los factores capaces de afectar el Contexto Operativo y, además, si el grupo de trabajo posee buena experiencia en RCM.

El historial de mantenimiento (fallas y reparaciones) no es indispensable que se encuentre en un sólido sistema informático. Para realizar un análisis RCM es más importante el conocimiento de los integrantes del grupo. El histórico de fallas técnicas sólo sirve para validar ciertos modos de falla dominantes porque, lamentablemente, ni siquiera en fallas con graves consecuencias se dispone siempre de información de calidad y en cantidad suficiente como para hacer estimaciones confiables. Al respecto, en la página 257 de su libro, John M. Moubray cita lo siguiente en alusión a las fallas con graves consecuencias: *"el mantenimiento preventivo exitoso implica evitar la recolección de datos históricos que creamos necesitar para decidir qué mantenimiento preventivo debemos hacer"*.

Solamente en algunos casos puntuales, los datos históricos de funcionamiento (el pasado) pueden servir como base de datos para mejorar las políticas de mantenimiento. Por ejemplo, en las tareas de búsqueda de fallos ocultos (mantenimiento detectivo) importa registrar los resultados hallados en los dispositivos de seguridad para validar los $MTBF_{ds}$ y optimizar las frecuencias detectivas iniciales (ver sección 5.3.4 Capítulo 5). En este caso son válidas las estadísticas del tipo *fallado / no fallado*. De igual forma sucede con el registro de la tasa de demanda de las funciones protegidas que servirán luego para ajustar el $MTBF_{fp}$. Esto significa que resultaría conveniente pasar al historial las veces en que una función protegida hace uso de su sistema de protección. Toda esta información (historial) es útil para realimentar los análisis RCM.

Los análisis RCM deben revisarse regularmente listando los posibles cambios de contexto operativo y verificando rápidamente que éstos no hayan alterado (agregado o anulado) modos de falla. Si el sistema no ha sufrido cambio alguno, la política de mantenimiento no debería alterarse; de lo contrario, se evalúan los cambios y se proponen las mejoras sobre el plan original.

7.2.4 Pasos de un Análisis RCM

Como regla general, el RCM busca responder siete (7) preguntas fundamentales (ver figura 7.2.2) dispuestas de tal forma que se constituyen dos etapas claramente diferentes. En la primera, se definen y determinan las *funciones, fallas funcionales, modos de falla* y *efecto de los fallos*, lo que significa responder a las cuatro primeras preguntas. La información resultante genera una planilla llamada *Hoja de Análisis*. La segunda etapa (responder las 3 últimas preguntas), define las tareas de mantenimiento más efectivas y económicas o las *acciones alternativas* (reactivas) en caso de no encontrarlas. Para esto último se usa un diagrama de decisión[1] al que se somete cada modo de falla, y se obtiene la *Hoja de Resultados*. La Hoja de Resultados contiene el plan de mantenimiento sugerido por la revisión RCM (con responsable y frecuencia de ejecución) y las acciones de mejora a implementar en el activo o en los procedimientos de operación.

Tanto para completar la Hoja de Análisis como la de Resultados, es ideal valerse de software's especializados que administran la información; no obstante, y en su defecto, pueden utilizarse planillas o procesadores de texto.

El diagrama de decisión se analiza con profundidad en la sección 7.2.4.6.

---

1 Existen en el mercado varias versiones. Se recomienda utilizar sólo aquellas que satisfagan la norma internacional SAE JA1012, páginas 48 y 49.

Pregunta	Descripción	Tópico / Paso	Mayor Aporte, aunque no único	Etapa / Soporte	
1	¿Cuáles son las funciones del sistema?(teniendo en cuenta sus patrones de funcionamiento en el Contexto Operativo actuante).	Funciones	Operación	Hoja de Análisis	
2	¿De qué forma no se cumplen las funciones?	Fallas Funcionales	Mantenimiento		
3	¿Cuáles son las causas que provocan las fallas funcionales?	Modos de Falla	Mantenimiento		
4	¿Qué sucede cuando ocurre cada modo de falla?	Efecto de los fallos	Operación		
5	¿Qué consecuencias provoca cada modo de falla?	Consecuencia de los fallos	Operación	Diagrama de Decisión	Hoja de Resultados
6	¿Qué se puede hacer para evitar, predecir o detectar cada modo de falla?	Acciones pro-activas	Mantenimiento		
7	¿Cómo proceder si no es posible evitar, predecir o detectar el modo de falla?	Acciones reactivas	Mantenimiento		

Figura 7.2.2
Modelo de las 7 preguntas y etapas del RCM.

Dentro de las *acciones alternativas* se destacan el Rediseño (Mantenimiento Mejorativo) como acción de mejora[1] y la situación en la que se recomienda no realizar ninguna acción pro-activa de mantenimiento programado (NAP); vale decir, sólo hacer mantenimiento correctivo.

Si bien la búsqueda de fallos ocultos - mantenimiento detectivo - no evita o predice los modos de falla del elemento chequeado (ver último párrafo de la sección 5.1.4 del Capítulo 5), se considera dentro de las posibles acciones pro-activas de mantenimiento y no como una acción alternativa. John M. Moubray, en la página 174 de su libro RCMII, las denomina acciones *"a falta de"* e incluye al mantenimiento detectivo dentro de ellas. No obstante, y en total coincidencia con el espíritu original del RCM (SAE JA1012 sección 15.3.2.3), sugerimos evaluar la búsqueda de fallos ocultos **sólo** si no fue posible hallar ninguna tarea a condición (o preventiva) que prediga (o evite) el modo de falla de manera eficaz y eficiente.

Antes de abordar los contenidos de la Hoja de Análisis, veamos algunos aspectos importantes con referencia al Contexto Operativo, aunque bien fueron anticipados en la sección 1.1.1 del Capítulo 1.

7.2.4.1 Contexto Operativo

El Contexto Operativo debe ser documentado (redactado) claramente antes de enumerar las funciones, evitando la redacción exagerada pero asegurando que pueda ser comprendido por cualquier persona del ámbito industrial. La descripción del Contexto permite conocer todas las circunstancias reales bajo las cuales funciona el equipo. Para ello, el facilitador tendrá que reunir la mayor cantidad de información antes de la primera reunión[2].

Las fuentes comunes de información son los manuales de mantenimiento, los diagramas de proceso, los instructivos de trabajo, los procedimientos operativos, las hojas técnicas de producto y de materias primas, los procedimientos de parada y puesta en marcha, las normas vigentes para seguridad y cuidado del medio ambiente, los documentos de calidad, etc., y, por sobre todas las cosas, el conocimiento de las personas. Sin ser indispensables, los datos históricos ayudan a recordar las reparaciones realizadas en el pasado y los problemas más frecuentes.

La descripción del contexto operativo debe incluir todos los dispositivos redundantes o de protección que posea la instalación.

La hipótesis del contexto dispara una definición importante: *equipos tecnológicamente iguales actuando en distintos contextos operativos, pueden demandar diferentes planes de mantenimiento.* Es decir que, la política de mantenimiento no depende sólo de lo que el activo **es**, sino también de lo que **hace** en el contexto actuante.

---

1 Ver sección 1.4 Capítulo 1.
2 Remítase a la sección 1.1.1 "Hipótesis del Contexto" del Capítulo 1, como guía para consolidar dicha información.

Resulta interesante el ejemplo de las tres bombas iguales[1] para demostrar la influencia del Contexto Operativo en los planes de mantenimiento de los activos. Supóngase el caso de la figura 7.2.3 donde las bombas A, B y C son idénticas. Cabe preguntarse si el plan de mantenimiento de cada una guardará alguna relación de similitud.

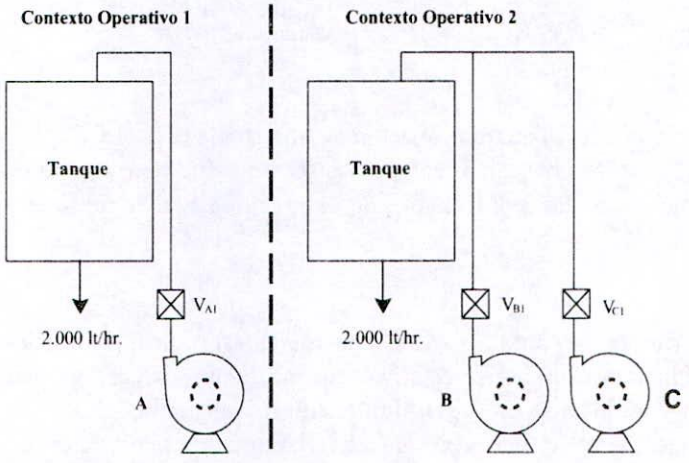


Figura 7.2.3
Diferente Contexto Operativo para bombas idénticas.

Analizamos primero el Contexto Operativo 1. La función principal de la bomba A es suministrar agua al tanque en ausencia de una bomba de reemplazo. Cualquier falla en A impedirá el abastecimiento de agua al tanque.

Sin entrar en detalles con referencia a las funciones, modos de falla o sus consecuencias, podría pensarse que una estrategia de mantenimiento válida para la bomba A sería: predictivo (para fallas sintomáticas), preventivo (para modos de falla relacionados con la edad), correctivo (para fallas imprevistas no cubiertas con las tareas anteriores) y restaurativo (para subsanar fallas sintomáticas identificadas con mantenimiento predictivo). Así, la bomba A sería objeto de cuatro tipos de mantenimiento.

En el Contexto Operativo 2, la bomba B tiene una función muy distinta si se compara con la función primaria de A. En este caso la función principal es suministrar agua al tanque pero con la presencia de un dispositivo redundante (bomba C). El plan de mantenimiento de la bomba B podría ser, por ejemplo: preventivo (para modos de falla relacionados con la edad) y correctivo (para fallas imprevistas). En este caso, se asume que la identificación de las fallas sintomáticas en B (mantenimiento predictivo) sólo permitirá programar el reemplazo de los elementos dañados. Por tal motivo, y solamente válido para este ejemplo, se excluye el mantenimiento predictivo y restaurativo. Así, B sería objeto de dos tipos de mantenimiento.

En el mismo Contexto, la bomba C podría merecer, por decir, mantenimiento detectivo (para fallos ocultos) y restaurativo (para fallas identificadas con mantenimiento detectivo). Siendo que la bomba C no funciona regularmente (es stand-by de B), tal vez tenga poco beneficio efectuar mantenimiento preventivo (salvo para modos de falla relacionados con el envejecimiento temporal si los tuviese). Si asumimos que ello no ocurre, la estrategia podría ser simplemente la mencionada y el resultado serían dos tipos de mantenimiento.

Obsérvese que aún siendo iguales las tres bombas, y bajo muchas suposiciones para facilitar la explicación, es bastante probable que la política de mantenimiento de cada una de ellas sea distinta. Obsérvese el cuadro resumen de la figura 7.2.4.

1 Ejemplo basado en uno de similares características y propuesto por John Moubray en su libro RCMII, página 31. Ver referencia bibliográfica.

Bomba	Estrategia
A	Predictivo Preventivo Correctivo Restaurativo
B	Preventivo Correctivo
C	Detectivo Restaurativo

Figura 7.2.4
Resumen de estrategias de mantenimiento para el ejemplo de las tres bombas.

Nota: Este ejemplo puede no guardar relación alguna con la realidad. El plan de mantenimiento de tres bombas en un Contexto Operativo real, podría ser muy diferente al aquí enunciado. Considérese este ejemplo únicamente con fines didácticos siendo que no se analizaron funciones, modos de falla ni consecuencias reales.

7.2.4.2 Funciones

El siguiente paso (primera pregunta del RCM) consiste en especificar las funciones del equipo o sistema analizado. Las funciones son las expectativas que los dueños, usuarios y mantenedores tienen con respecto al activo. Deben listarse en orden numérico en la primera columna de la Hoja de Análisis. La experiencia demuestra que es necesario redactar claramente cada función utilizando, al menos, un *verbo* en infinitivo, un *objeto* (sustantivo) y un *parámetro de funcionamiento o prestación deseada* (valor o entorno de valores) siempre que sea posible.

Resulta imposible establecer cuándo una función **falla** sin el parámetro de funcionamiento (o prestación deseada) explicitado. El grupo debe asegurarse que la prestación exigida para una función sea inferior a la capacidad nominal (o inherente) del equipo que provee dicha función. El estándar de funcionamiento que debe describir la función no es la capacidad inherente (nominal) del activo, sino la prestación deseada. La diferencia entre lo que el activo es capaz de dar y lo que se espera de él (función) es el margen reservado para su *deterioro*.

La norma SAE JA1012 establece que las funciones *primarias* (específicas) del activo son la razón de su adquisición. La lista de funciones primarias cubren parámetros de funcionamiento como volumen producido, velocidad, capacidad de carga o transporte, calidad del producto y servicio al cliente, entre otros.

Por su lado, las funciones *secundarias* se refieren a temas menos evidentes (no menos importantes) como control, seguridad, protección, capacidad de contención, información, apariencia, eficiencia, integridad, cumplimiento de leyes o estándares ambientales, etc. En muchas ocasiones, la consecuencia del incumplimiento de una función secundaria es más grave que el incumplimiento de una función primaria. A continuación se listan ejemplos de funciones primarias y secundarias no pertenecientes a un mismo equipo ni a un mismo contexto operativo, son únicamente funciones elegidas al azar.

Funciones Primarias

- √ Impulsar (*verbo*) agua (*objeto*) desde el tanque cisterna "X" a un tanque elevado "Y" a no menos de 50 lt/min (*parámetro de funcionamiento*).
- √ Calentar (*verbo*) una masa de 1.000 Kg. o menos, de producto "X" (*objeto*) desde 5°C hasta 80 °C en 2 horas (*parámetro de funcionamiento*).
- √ Contener (*verbo*) completamente el líquido (*objeto*) "X" en el tanque sin pérdidas (*prestación deseada*).
- √ Aliviar (*verbo*) la presión interior del reactor (*objeto*) si alcanza los 10 Kg/cm^2 (*parámetro de funcionamiento*).

√ Mantener (*verbo*) la temperatura interior del habitáculo (*objeto*) entre 18 y 30 °C, según la selección de los ocupantes (*parámetro de funcionamiento*).
√ Transportar (*verbo*) bolsas de 50 +/- 1 Kg (*objeto*) a una velocidad de 20 mt/min +/- 5%, evitando que se adhieran sobre la cinta de transporte (*parámetro de funcionamiento*).

Funciones Secundarias[1]

√ Indicar (*verbo*) por medio de una alarma sonora en la sala de control (*objeto*), cuando la temperatura del agua de refrigeración alcanza 150 °C (*parámetro de funcionamiento*).
√ Detener (*verbo*) la marcha de la bomba (*objeto*) si el nivel de agua del tanque "Y" llega a dos metros (*parámetro de funcionamiento*).
√ Poner (*verbo*) en funcionamiento la bomba (*objeto*) cuando el nivel del tanque "Y" es de 20 cm. (*parámetro de funcionamiento*).
√ Dar (*verbo*) un aspecto agradable (*prestación deseada*).
√ Impedir (*verbo*) que las correas de accionamiento del ventilador (*objeto*) puedan lastimar a alguien bajo cualquier circunstancia (*prestación deseada*).
√ Indicar (*verbo*) localmente la presión interior del reactor "Z" (*objeto*) con una precisión de, al menos, +/- 2% (*parámetro de funcionamiento*).
√ Emitir (*verbo*) no más de 3 ppm (*parámetro de funcionamiento*) del elemento "X" (*objeto*).
√ Detener (*verbo*) la marcha de la prensa (*objeto*) al abrir cualquier puerta de seguridad (*prestación deseada*).

La norma ISO 14224[2] establece que un **sistema** es un conjunto de **equipos** (o subsistemas). Las funciones de los **equipos** hacen posible que el **sistema** satisfaga los requerimientos del proceso productivo. Las fallas funcionales (debidas a cualquier modo de falla), ocurridas en los equipos (o subsistemas), pueden afectar directamente la funcionalidad de todo el sistema. A su vez, un equipo puede dividirse en **componentes** (ítems mantenibles según ISO 14224) sobre los que recaerán las acciones (estrategia) de mantenimiento. Cuando los componentes **fallan** (a través de sus modos de falla) provocan la pérdida de función en los equipos.

La figura 7.2.5 muestra la primera columna de la Hoja de Análisis de una revisión RCM en la que se ubican algunas de las funciones de un reactor químico.

Hoja de Análisis RCM	
Sistema: Producción de SILTRES-XX	
Equipo: Reactor Químico 02R7	
Funciones	
1	Calentar hasta 10.000 Kg. del producto "X" desde 2 °C hasta 80 °C, en 2 horas.
2	Cargar con agua el reactor a no menos de 250 lt/min.
3	Evitar pérdidas de agua en el reactor y en todas sus conexiones.
4	Permitir el ingreso de los sólidos (materias primas) por la tolva de alimentación superior.
5	Evitar derrames y salidas de producto sólido al exterior cuando se realiza la carga por la tolva.
6	Mantener la presión de vapor en la serpentina de calentamiento en 6 +/- 0,2 bar.
7	Indicar en el tablero local la temperatura de la masa de producto con una precisión de, al menos, +/- 2%.
8	Evacuar todos los gases o vapores de la reacción a través del conducto CON-34-K.
9	Permitir seleccionar la velocidad de agitación (rotación eje agitador) entre 1 y 25 rpm, a intervalos de 1 rpm.
10	Indicar localmente la presión de vapor.
11	Detener inmediatamente el agitador si la corriente del motor 02MR7 alcanza los 25 A.
12	Evitar pérdidas de producto en el reactor y en todas sus conexiones.
13	Evitar quemaduras a las personas.
14	Detener la marcha del agitador inmediatamente después de oprimir el botón Parada de Emergencia.
15	Indicar en el sistema de control, y de manera legible desde el puesto de trabajo, los parámetros: presión, temperatura, nivel de producto y etapa del proceso.
16	Descargar el producto terminado a través de la válvula automática de fondo VAL01-02R7.

Figura 7.2.5
Ejemplo de Funciones para un reactor químico.

1 Dentro de las Funciones Secundarias pueden incluirse aquellas que cumplen los Dispositivos de Protección, sección 5.1.1 del Capítulo 5.
2 La norma ISO 14224 proporciona una guía para establecer la jerarquía de los activos en Plantas de petróleo y gas.

7.2.4.3 Fallas Funcionales

Una falla funcional es un estado a partir del cual un equipo es, total o parcialmente, incapaz de cumplir los parámetros de funcionamiento definidos en sus funciones. También se conoce como estado de falla, y es la manera (o forma) en que la función puede no cumplirse. Las fallas funcionales pueden ser fallas parciales en las que el activo aún funciona pero con un nivel de desempeño inaceptable.

Por ejemplo, si una línea envasadora de bebidas posee una llenadora cuya función primaria se definió como *"llenar las botellas con 500 +/- 3 cm^3 de líquido a una velocidad de, al menos, 25.000 botellas/hora."*, puede ocurrir que la máquina cumpla con los estándares de calidad pero no con los valores de eficiencia requeridos. Veamos las posibles fallas funcionales de este ejemplo.

√ Totalmente incapaz de llenar botellas.
√ Llena botellas con menos de 497 cm^3.
√ Llena botellas con más de 503 cm^3.
√ Llena botellas a menos de 25.000 botellas/h.

Si la función de un sistema de control se describe como *"hacer sonar una alarma en la sala de control cuando la temperatura del agua de refrigeración llega a 95 °C"*, sus fallas funcionales podrían ser:

√ No suena cuando la temperatura llega a 95 °C.
√ Suena cuando la temperatura es inferior a 95 °C.

Supóngase que un sistema de aspiración de polvos tiene un ventilador cuya función primaria es *"impulsar aire a no menos de 1.000 m^3/h"*. Las fallas funcionales en este caso, podrían ser:

√ Totalmente incapaz de impulsar aire.
√ Impulsa aire a menos de 1.000 m^3/h.

Los ejemplos anteriores ponen en evidencia que una función puede tener más de una falla funcional; es decir, más de una *forma de fallar*. Es necesario discriminar y enumerar todos los posibles estados de falla, porque cada uno puede originarse por modos de falla distintos y producir, además, distintas consecuencias.

De igual manera que con las funciones, *elementos idénticos pueden tener fallas funcionales diferentes si el contexto operacional es diferente.*

Las fallas funcionales se ubican en la segunda columna de la Hoja de Análisis; un ejemplo de ello lo muestra la figura 7.2.6 relacionada con el ejemplo anterior del reactor químico.

Hoja de Análisis RCM			
Sistema: Producción de SILTRES-XX			
Equipo: Reactor Químico 02R7			
Funciones		**Fallas Funcionales**	
1	Calentar hasta 10.000 Kg. del producto "X" desde 2 °C hasta 80 °C, en 2 horas.	A	El reactor es totalmente incapaz de calentar el producto.
		B	Se tarda más de 2 horas en alcanzar la temperatura de 80 °C en toda la masa de producto.
		C	El producto se calienta por encima de 80 °C.
2	Cargar con agua el reactor a no menos de 250 lt/min.	A	No carga nada de agua.
		B	Carga agua a menos de 250 lt/min.
3	Evitar pérdidas de agua en el reactor y en todas sus conexiones.	A	Se producen pérdidas de agua en el reactor o sus conexiones.
4	Permitir el ingreso de los sólidos (materias primas) por la tolva de alimentación superior.	A	Incapaz de dar ingreso libremente a los productos sólidos.
5	Evitar derrames y salidas de producto sólido al exterior cuando se realiza la carga por la tolva.	A	Se producen fugas de producto sólido (aún en pequeñas cantidades) durante la maniobra de carga.
6	Mantener la presión de vapor en la serpentina de calentamiento en 6 +/- 0,2 bar.	A	La presión de vapor es superior a 6,2 bar en la serpentina.
		B	La presión de vapor es menor que 5,8 bar en la serpentina.
7	Indicar en el tablero local la temperatura de la masa de producto con una precisión de, al menos, +/- 2%.	A	No indica la temperatura localmente.
		B	Indica la temperatura localmente con un error superior al +/- 2%.
8	Evacuar todos los gases o vapores de la reacción a través del conducto CON-34-K.	A	Totalmente incapaz de evacuar gases o vapores de la reacción.
		B	Permite una evacuación parcial de los gases o vapores generados.
9	Permitir seleccionar la velocidad de agitación (rotación eje agitador) entre 1 y 25 rpm, a intervalos de 1 rpm.	A	La velocidad de agitación es menor a 1 rpm.
		B	La velocidad de agitación supera las 25 rpm.
		C	No se puede seleccionar la velocidad a intervalos de 1 rpm.
10	Indicar localmente la presión de vapor.	A	No indica localmente la presión de vapor.
11	Detener inmediatamente el agitador si la corriente del motor 02MR7 alcanza los 25 A.	A	No detiene la agitación cuando la corriente del motor 02MR7 alcanza los 25 A.
		B	Detiene la marcha del agitador cuando la corriente del motor 02MR7 es menor a 25 A.
12	Evitar pérdidas de producto en el reactor y en todas sus conexiones.	A	Se producen pérdidas de producto durante la elaboración en el reactor o sus conexiones.

Figura 7.2.6
Ejemplo de Fallas Funcionales para un reactor químico.

7.2.4.4 Modos de Falla

El análisis (descripción) de los modos de falla es la parte más importante del RCM. Un modo de falla es un *evento* (causa raíz) que puede ocurrir en el componente y provocar la falla funcional del equipo al que pertenece. La causa raíz puede ser de índole física, humana o administrativa. Es de esperar que suceda una falla funcional por más de un motivo; vale decir, por más de un modo de falla.

Una falla funcional puede ser originada por más de un modo de falla y, además, un mismo modo de falla puede ser el responsable de más de una falla funcional. Estos últimos se denominan modos de falla comunes[1].

No deben identificarse sólo las causas físicas (mecanismos de falla); una proceso de revisión RCM debe listar todas las probables causas raíz que provocarían la falla funcional, incluyendo los errores humanos[2], de diseño o los problemas administrativos.

Para sistemas sencillos es suficiente que el grupo genere un listado (brainstorming) con las que, a su juicio, pueden ser las causas de falla. Deben considerarse los modos de falla (*fallos*) que han ocurrido en el pasado y aquellos que, sin haber sucedido aún, tienen una razonable probabilidad de hacerlo. También, aquellos que están siendo prevenidos por cualquier tarea de mantenimiento, aún exitosa.

El nivel de profundidad alcanzado cuando se enumeran modos de falla depende del nivel de conocimiento de los integrantes del grupo y del juicio del facilitador, quien debe asegurar que se llegue a la verdadera causa raíz, que no se omitan fallos con razonable probabilidad de ocurrencia y que no se listen aquellos cuyas posibilidades son remotas.

En sistemas complejos, la cantidad, diversidad y dependencia de los modos de falla obligan, en muchos casos, al uso de herramientas auxiliares como las enumeradas a continuación.

1 Ver sección 1.2.3 del Capítulo 1 "Tipos de Modos de Falla".
2 Los errores humanos se combaten con programas de capacitación en el puesto de trabajo. Ver sección 7.4.4.1 "Pilar Mantenimiento Autónomo" Capítulo 7 y sección 10.4.1 "Capacitación" del Capítulo 10.

- √ Técnica del Por qué - Por qué (sección 7.3.3)
- √ Diagrama Causa - Efecto (Diagrama de Ishikawa) (sección 7.3.4)
- √ Análisis P-M (Physical Mechanism) (sección 7.3.6)
- √ Árbol de Fallas (sección 7.3.8)
- √ Análisis Causa - Raíz de Falla (RCA) (sección 7.3.7)
- √ OREDA[1] (fuente de posibles modos de falla y sus posibilidades de ocurrencia)

Suele discutirse si es preciso analizar aquellos modos de falla que, si bien influyen en el desempeño del activo, el control y la responsabilidad exceden los límites del análisis. Tales modos de falla se encuentran (físicamente) fuera del sistema estudiado.

Por ejemplo, un motor eléctrico no cumplirá sus funciones si *se interrumpe el suministro de energía eléctrica*. Aún pensando que se trata de un modo falla, las causas que lo producen excederían el alcance de la revisión. Se aconseja, entonces, listar el "modo de falla" y en la cuarta columna **Efecto de los Fallos** mencionar que el modo de falla *"X" se estudia en otro análisis RCM"*.

Los modos de falla se enumeran en la tercera columna de la Hoja de Análisis. Su redacción debe incluir un *objeto* (parte o elemento), un *participio pasivo* o un *adjetivo* que califiquen el estado de deterioro del elemento y, en algunos casos, la *situación de falla*. Por ejemplo:

- √ Rodamiento (*objeto*) engranado (*participio pasivo*).
- √ Luz (*objeto*) quemada (*participio pasivo*).
- √ Válvula (*objeto*) atascada (*participio pasivo*) en posición cerrada (*situación de falla*).
- √ Interruptor (*objeto*) trabado *(participio pasivo)* en posición abierta (*situación de falla*).
- √ Aceite (*objeto*) contaminado *(adjetivo)* con agua (*situación de falla*).
- √ Cajera del cojinete (*objeto*) suelta (*adjetivo*).
- √ Tornillos (*objeto*) flojos (*adjetivo*).
- √ Lubricación (*objeto*) insuficiente (*adjetivo*).
- √ Lubricación (*objeto*) deficiente (*adjetivo*).
- √ Termocupla (*objeto*) descalibrada (*participio pasivo*).

También se acepta la siguiente modalidad para listar los mismos modos de falla.

- √ Se engrana el rodamiento.
- √ Se quema la luz.
- √ Se atasca la válvula en posición cerrada.
- √ Se traba el interruptor en posición abierta.
- √ Se contamina el aceite con agua.
- √ Se suelta la cajera del cojinete.
- √ Se aflojan los tornillos.
- √ Se hace insuficiente la lubricación.
- √ Se hace deficiente la lubricación.
- √ Se descalibra la termocupla.

Palabras como *gastado, corroído, erosionado, torcido, doblado, sucio, contaminado, trabado, engranado, atascado, ajustado, desajustado, quemado, suelto, cortado, salido, exfoliado, agrietado, fatigado, fundido, picado, perforado, desacoplado, inadecuado, obstruido, cerrado, abierto, caído, rigidizado, degradado, despresurizado, mordido, desfasado, rayado, desoldado, mal lubricado, mal montado, mal regulado, mal diseñado, mal ajustado, mal programado, mal calibrado,* etc., pueden ayudar a redactar modos de falla.

---

1 OREDA (Offshore Reliability Data) es un compendio de datos de confiabilidad para componentes (y equipos) usados en la exploración y producción de petróleo y gas, cuyo objetivo es mejorar la seguridad y costo-efectividad de las instalaciones. Además de listar los posibles modos de falla para cada instalación, provee una base de datos sobre su probabilidad de ocurrencia.

Existen en el mercado industrial listas genéricas de modos de falla, y aunque tiene algún sentido usarlas como guía, siempre debe evaluarse cada fallo en su contexto operativo real. El grupo de trabajo debería analizar (con la experiencia de los integrantes) si el modo de falla es aplicable a la revisión RCM que se está realizando.

Estos listados, obligan a analizar más modos de falla de los que el sistema tiene. Exagerar la cantidad de fallos insume tiempo y no necesariamente resuelve mejor las consecuencias de las fallas funcionales. La figura 7.2.7 muestra algunos modos de falla para el mismo reactor químico. Sin embargo, este ejemplo no contiene todos los modos de falla que podrían ocurrir para cada falla funcional, por lo que no se recomienda adoptarlo como guía para estudios reales.

Hoja de Análisis RCM					
Sistema: Producción de SILTRES-XX					
Equipo: Reactor Químico 02R7					
Funciones		Fallas Funcionales		Modos de Falla	
1	Calentar hasta 10.000 Kg. del producto "X" desde 2 °C hasta 80 °C, en 2 horas.	A	El reactor es totalmente incapaz de calentar el producto.	1	Válvula reguladora de vapor (VAP-02-AU) bloqueda en posición cerrada.
				2	Válvula de vapor VAP-01-Y1 cerrada.
				3	Rodamientos del motor 02MR7 con lubricación insuficiente.
				4	Aislación del motor 02MR7 deteriorada o dañada.
				5	"Falla" motor 02MR7 por otras causas.
				6	"Falla" reductor 02G7.
				7	Protección térmica del motor 02MR7 activada.
				8	Chaveta del acoplamiento del reductor 02G7 salida.
				9	Acoplamiento del reductor roto.
				10	Tornillos de ajuste eje-agitador salidos o corroídos.
				11	Eje de agitador cortado.
				12	Serpentina de vapor fisurada hacia el interior.
				13	Falta suministro de vapor.
				14	.....
		B	Se tarda más de 2 horas en alcanzar la temperatura de 80 °C en toda la masa de producto.	1	Serpentina de vapor obstruida.
				2	Serpentina de vapor fisurada hacia el exterior.
				3	Juntas o bridas dañadas en el circuito de vapor.
				4	Conexiones de vapor fisuradas o dañadas.
				5	Válvula reguladora de vapor (VAP-02-AU) calibrada por debajo de 6 bar.
				6	Trampas de vapor obstruidas.
				7	Suministro de vapor insuficiente.
				8	La masa de producto dentro del reactor supera los 10.000 Kg.
				9	.....
		C	El producto se calienta por encima de 80 °C.	1	Termocupla de control descalibrada.
				2	Termocupla equivocada.
				3	Sistema de transmisión de la señal al PLC "fallado".
				4	Lógica de control mal programada.
				5	.....

Figura 7.2.7
Ejemplo de Modos de Falla para el reactor químico.

Excepto para los casos en que el modo de falla se estudie en otro análisis RCM, deben evitarse descripciones del tipo *"falla el ventilador"* o *"falla el sistema de encendido"*. Si el modo de falla será analizado por el grupo que lo identifica, entonces deben enumerarse todas las causas que harían que *"falle el ventilador"*. Sin embargo, es recomendable estudiar por separado los equipos o subsistemas que contengan una gran cantidad de modos de falla. Una descripción detallada de modos de falla permitirá encontrar la estrategia de mantenimiento más apropiada para cada uno. Recuérdese que un plan de mantenimiento lucha contra modos de falla, y la única manera de tener éxito es reconocerlos.

Retomando el concepto sobre el nivel de profundidad a adoptar para enumerar modos de falla, caben algunos comentarios adicionales tomados de la norma SAE JA1012, sección 8.3.1. La misma refiere lo siguiente:

...el término "causa raíz" se usa frecuentemente en conexión con el análisis de fallas. Esto implica que si se profundiza lo suficiente es posible llegar a un nivel causal final y absoluto. De hecho, por lo general esto no sucede.

... por ejemplo un modo de falla posible para una bomba centrífuga es "tuerca del impulsor sobreajustada", que a su vez es causado "por error de montaje". El error de montaje podría haber ocurrido porque el "técnico que lo montó estaba distraído". Podría haber estado distraído porque "su hijo estaba enfermo". Esta falla pudo haber ocurrido porque "el niño comió algo que estaba en mal estado".

Claramente, este proceso de apertura podría continuar ilimitadamente – incluso más allá del punto en que la organización responsable de operar y mantener el activo tiene control sobre los modos de falla. Esta es la razón por la que la norma SAE JA1011 enfatiza que el nivel al que debería ser identificado un modo de falla es aquel en el cual es posible identificar una política apropiada para el manejo de la falla...

El facilitador con su experiencia debe definir el nivel de profundidad adoptado para cada modo de falla, en su contexto operativo y en función de los recursos disponibles por la organización. Ciertos contextos operativos pueden requerir mayor profundidad de análisis, porque un mismo modo de falla puede tener consecuencias diferentes en función de dicho contexto.

7.2.4.5 Efecto de los Fallos

La cuarta y última columna de la Hoja de Análisis, se usa para describir la secuencia de lo que sucedería si se produce el modo de falla; es decir, el *Efecto del Fallo*. La descripción debe tener la suficiente información como para que, en el próximo paso, se puedan evaluar las consecuencias.

No debe confundirse el *efecto*, con la *consecuencia* del fallo; el primero tiene más que ver con la descripción secuencial de lo acontecido, mientras que la consecuencia cuantifica su impacto.

Algunas pautas que ayudan a describir los efectos de un modo de falla, son las siguientes:

√ **Cuál** es la evidencia de que ha ocurrido el fallo (si existe tal evidencia). Para el caso de fallos ocultos, redactar lo que sucedería si ocurre la falla simultánea.
√ **Cómo** y **de qué forma** impacta el fallo en la seguridad de las personas o en el medio ambiente (si impacta).
√ **Cómo** y **de qué forma** impacta el fallo en las ventas, producción, calidad o servicio al cliente (si impacta).
√ **Cómo** y **de qué forma** impacta el fallo en la integridad de los activos físicos (si impacta).
√ **Cuál** es el gasto y el tiempo para revertir el daño. **Qué** acciones deben tomarse. **Cuál** es, si puede estimarse, el MTBF (*tiempo medio entre fallos*) para el modo de falla.

El efecto del fallo hay que describirlo como si nada se estuviese haciendo para impedirlo. La descripción debe dar la máxima claridad respecto a si se trata de un *fallo oculto o evidente*[1]. En ningún caso debe intentarse evaluar las consecuencias; sólo describir fríamente **qué ocurre** y **cómo** se solucionaría.

Los riesgos más comunes que un modo de falla puede ocasionar en relación con la seguridad o el medio ambiente, se destacan a continuación.

√ Incendio o explosiones.
√ Choque eléctrico.
√ Golpes o caída de objetos.
√ Exposición a fuentes de calor, radiación, ruido, vibración, etc.
√ Escape de gases tóxicos.
√ Derrame de líquidos peligrosos o cantaminantes.
√ Golpe con objetos (máquinas) en movimiento.
√ Contaminación de productos de consumo masivo.
√ Violación a normativas o regulaciones medioambientales.

La figura 7.2.8 representa la Hoja de Análisis del reactor químico del ejemplo anterior. Sólo se muestra el efecto de los fallos de la primera función y de la primera falla funcional (01A).

1 Ver sección 5.1.3 "Fallos Ocultos" Capítulo 5.

Hoja de Análisis RCM					
Sistema: Producción de SILTRES-XX				**Grupo 4**	**Facilitador: Perez Ramón**
Equipo: Reactor Químico 02R7					**Fecha: 12/03/2002**
Funciones	**Fallas Funcionales**	**Modos de Falla**		**Efecto de los Fallos**	
1 Calentar hasta 10.000 Kg. del producto "X" desde 2 °C hasta 80 °C, en 2 horas.	A El reactor es totalmente incapaz de calentar el producto.	1	Válvula reguladora de vapor (VAP-02-AU) bloqueda en posición cerrada.	La válvula reguladora de vapor mantiene la presión en toda la línea de calefacción en 6 +/- 0,2 bar. Si se traba en posición cerrada impide el paso de vapor a la serpentina y el producto no puede calentarse. Las normas internas indican que ante una falla de estas características, la válvula debe ser reemplazada de inmediato. El tiempo total de reparación es 4 horas y la válvula tiene un costo de $17.000. Las pérdidas de producción se estiman en $12.300/bach.	
		2	Válvula de vapor VAP-01-Y1 cerrada.	La válvula puede quedar cerrada por olvido durante las maniobras de operación. Los operadores suelen tener evidencia naturalmente y a los pocos minutos de comenzado el proceso de fabricación.	
		3	Rodamientos del motor 02MR7 con lubricación insuficiente.	La falta de lubricante en los rodamientos del motor 02MR7 puede dejarlo fuera de servicio. Las rutinas de lubricación están vigentes y se realizan con regularidad. El tiempo necesario para un cambio de motor es de 3 horas y el costo nunca ha superado los $3.500.	
		4	Aislación del motor 02MR7 deteriorada o dañada.	La organización cuenta con rutinas de inspección por termografía infrarroja para los motores de estas características. Un daño severo en la aislación deja el motor fuera de servicio. El tiempo necesario para un cambio de motor es de 3 horas y el costo nunca ha superado los $3.500.	
		5	"Falla" motor 02MR7 por otras causas.	*Los modos de falla adicionales del motor 02MR7 se estudian en otro análisis RCM.*	
		6	"Falla" reductor 02G7.	*El reductor 02G7 se estudia en otro análisis RCM.*	
		7	Protección térmica del motor 02MR7 activada.	*Ver función 11 y fallas funcionales asociadas.*	
		8	Chaveta del acoplamiento del reductor 02G7 salida.	Se produce un desacoplamiento y se detiene la agitación. El producto en la parte central no llega a calentarse. De todas maneras, no debe reprocesarse porque la reparación nunca supera la media hora.	
		9	Acoplamiento del reductor roto.	Se produce un desacoplamiento y se detiene la agitación. El producto en la parte central no llega a calentarse. De todas maneras, no debe reprocesarse porque la reparación nunca supera la media hora.	
		10	Tornillos de ajuste eje-agitador salidos o corroídos.	La pérdida de, al menos, dos tornilos de sujeción puede ocasionar la rotura del soporte y el agitador se desvincula del eje. Se interrumpe completamente el proceso químico dentro del reactor. Los costos de la reparación pueden ascender a $85.000 y la producción se interrumpe por 4 días consecutivos porque es necesario vaciar y limpiar el interior del reactor.	
		11	Eje de agitador cortado.	El corte del eje del agitador en forma imprevista es muy poco probable. De todas formas, si ocurriese, se detiene el proceso, el tiempo de reparación es 4 días y el costo asciende a $ 145.000. (Existe en el Almacén Central un eje de repuesto).	
		12	Serpentina de vapor fisurada hacia el interior.	Se pierde poder de calefacción y el producto se contamina con agua quedando fuera de especificación. La reparación en el peor de los casos puede costar hasta $23.000 y demora 1 día. Las pérdidas de producción ascienden a $12.300/bach.	
		13	Falta suministro de vapor.	*El suministro de vapor se estudia en otro análisis RCM.*	
		14	.....	.....	

Figura 7.2.8
Efecto de los Fallos para el reactor químico del ejemplo anterior.

7.2.4.6 Consecuencia de los Fallos

En este punto analizamos **qué importancia** tiene **cada** modo de falla; es decir, **cuánto** impacta en el proceso productivo completo. Algunos autores denominan a este paso "definición de criticidad"; lo que es apropiado sólo si se tienen en cuenta algunas consideraciones especiales.

Resulta que los *análisis de criticidad* (Ver Anexo VI) generalmente se refieren a un activo (o sistema) completo, y son cualitativos. En pocas ocasiones se hace un análisis de criticidad para **cada** modo de falla. En rigor, sobre un mismo equipo pueden actuar decenas y a veces cientos de modos de falla, por lo que es imposible establecer un *nivel* de criticidad para el activo que sea representativo de todos sus modos de falla.

Siendo que normalmente las funciones primarias de un equipo son las más obvias, se cree que cuando "falla" lo hace **sólo** a través de las funciones primarias (bombear agua, transportar bolsas, moler producto, calentar agua, etc.). No obstante, esos mismos equipos pueden tener muchas otras funciones secundarias, no tan obvias, aunque sí muy importantes. La falla funcional de cualquiera de éstas (causada por otros modos de falla), podrá tener consecuencias distintas que las ocasionadas por las fallas funcionales de las funciones primarias. Por tal motivo, es preferible referirse a las *consecuencias* de cada modo de falla más que a la *criticidad del activo*.

Ya se ha dicho que una estrategia de mantenimiento adecuada es aquella que considera cómo interfiere cada fallo en el sistema productivo (consecuencia). Veamos, entonces, cómo el RCM define la estrategia más costo - eficaz para evitar los fallos o minimizar sus consecuencias.

Las consecuencias de los fallos se dividen en seis tipos o categorías (figura 7.2.9).

	IMPACTO		
Falla Una Función	Seguridad y Medio Ambiente	Producción y Activos Fijos	Sólo el Gasto de la Reparación
Evidente	1A	2A	3A
Oculta	1B	2B	3B

Figura 7.2.9
Categoría de las consecuencias de los fallos.

El primer paso es establecer si el modo de falla es oculto o evidente. Los fallos ocultos son las causas que provocan la indisponibilidad de una *función oculta*. Algunos ejemplos de funciones ocultas se listan a continuación.

√ Señalizar a través de una alarma visual si la temperatura supera 120 °C.
√ Desconectar el motor eléctrico cuando el consumo excede 30 A.
√ Reducir la presión interior de la caldera cuando la presión alcanza 120 psi.
√ Detener la marcha de la embolsadora si se abre la puerta de ingreso.
√ Evitar que alguien salga herido o lastimado si se corta una correa de accionamiento.
√ Impedir un golpe contra el parabrisas cuando se produce un choque automovilístico.
√ Detener el descenso de la carga, accionando freno de emergencia, cuando la velocidad del tambor enrollador es mayor a 30 rpm.
√ Proporcionar hasta 1.000 lt/min de agua en cualquiera de las bocas de incendio.

En segundo lugar se determina si la falla de la función afecta la seguridad o el medio ambiente, la producción o los activos fijos, o únicamente produce gastos vinculados a la reparación.

El Diagrama de Decisión

La metodología sugiere usar un **diagrama de decisión** para evaluar **cuánto** impacta el modo de falla, y definir la tarea más apropiada en cada caso. El diagrama de la figura 7.2.10 satisface la norma SAE JA1012.

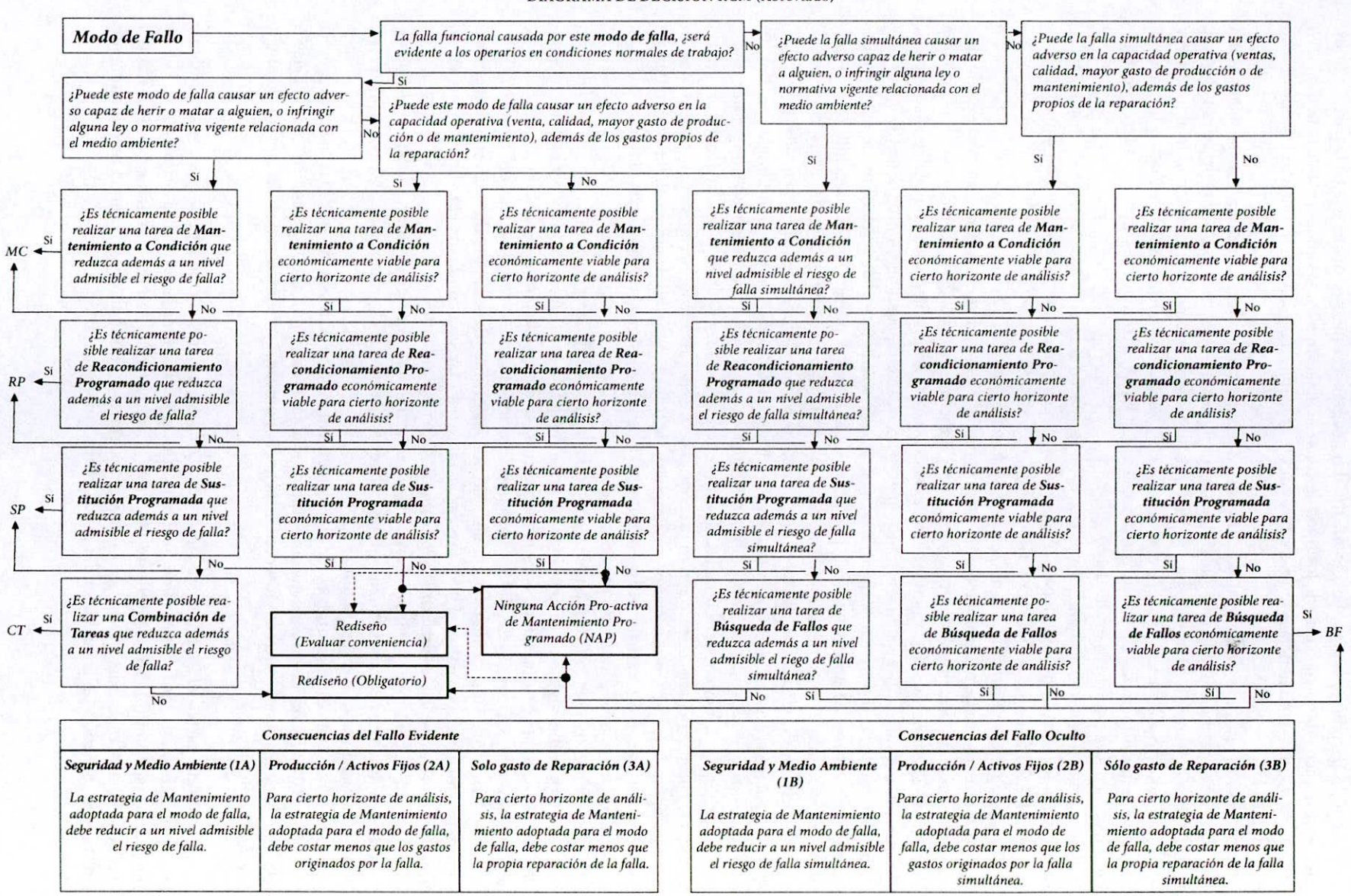


Figura 7.2.10
Diagrama de Decisión RCM (Abreviado).

En sentido horizontal vemos al diagrama dividido en seis sectores según aparece en la parte inferior. Cada sector hace referencia a uno de los tipos de consecuencias mostrados en la tabla de la figura 7.2.9. Las tres primeras consecuencias - comenzando desde la izquierda - son las producidas cuando el fallo es evidente (1A, 2A y 3A).

Si se trata de un fallo evidente y, además, las consecuencias podrían lesionar o matar a alguien o tener un efecto perjudicial en el medio ambiente, entonces debe descenderse por la primera columna. A partir de este punto, la metodología propone preguntarse si será posible técnicamente alguna tarea de mantenimiento a condición (sobre el modo de falla analizado) que, además, reduzca a un nivel de tolerancia la falla funcional. En caso afirmativo, la salida hacia la izquierda es efectuar la tarea de mantenimiento a condición (MC) evaluada.

Téngase en cuenta que las condiciones que debe satisfacer el intervalo de tiempo entre la falla sintomática y la falla funcional (Δt_{SF}), para que la tarea sea técnicamente aplicable, fueron analizadas en la sección 3.1.2 del Capítulo 3 (figura 3.1.3).

De ser negativa la respuesta, se desciende por la misma columna y es el turno de preguntarse si no será posible una tarea de reacondicionamiento programado (RP). La respuesta será afirmativa sólo si se cumplen ciertas condiciones (ver sección 2.2.1 del Capítulo 2, figura 2.2.5). Se podrá escoger una tarea de reacondicionamiento, sólo si reduce a niveles de tolerancia admisibles el riesgo de falla. Si la respuesta es negativa, se hace una evaluación similar pero para rutinas de sustitución programa (SP).

La última opción pro-activa posible, es realizar alguna combinación de tareas. Por ejemplo, aplicar simultánea mantenimiento a condición (predictivo / proactivo) y preventivo. Ver sección 3.1.5 *"Monitoreo Discrecional - Por combinación de tareas"*. Sin embargo, la combinación de tareas debe usarse únicamente en los casos en que una tarea por sí sola no reduce el riesgo de falla funcional.

Si se agotase la instancia pro-activa, queda entonces el Rediseño como acción obligatoria. Por rediseño mandatorio se entiende aquel desarrollado en la sección 6.4 *"Mantenimiento Mejorativo"* del Capítulo 6. Es importante reiterar que las modificaciones pueden ser físicas u operativas. Las primeras se refieren a intervenciones que resuelven problemas de diseño, crónicos, etc. en los activos. Las modificaciones operativas pueden cambiar procedimientos de trabajo o métodos para evitar la ocurrencia del fallo. Cualquiera fuese el caso, el rediseño también debe lograr el nivel de tolerancia al riesgo exigido a las acciones pro-activas estudiadas previamente.

Contrariamente, si el fallo no pone en riesgo la seguridad de las personas ni el medio ambiente, entonces la pregunta siguiente discrimina si el fallo impacta (o no) en los factores o bienes de producción. Obsérvese que esta pregunta sirve para decidir si se desciende por la segunda o tercera columna del diagrama (consecuencias 2A ó 3A). Las consideraciones para optar por tareas del tipo MC, RP ó SP son similares que en la primera columna, sólo que las mismas deberán justificarse económicamente para cierto horizonte de análisis. En los dos casos, tanto para tareas a condición (predictivo / proactivo) como preventivas, se sugiere referirse a los capítulos correspondientes.

En la tercera columna - cuando el fallo cuesta únicamente lo que cuesta su reparación - la justificación económica develará si la tarea propuesta cuesta menos que el propio fallo. Solamente bajo estas condiciones será mejor efectuar la tarea.

No obstante, tanto en la segunda como en la tercera columna, y no habiendo encontrado tareas pro-activas (MC, RP ó SP), puede resultar aún conveniente evaluar si con algún simple rediseño puede evitarse el fallo o reducir sus consecuencias. Obsérvense las líneas punteadas opcionales antes del cuadro *"Rediseño (Evaluar conveniencia)"*.

La segunda parte del diagrama se subdivide, también, en tres sectores pero que corresponden a las consecuencias de los fallos ocultos. Si el fallo es oculto, el interés se centraliza realmente en la *falla simultánea* (sección 5.1 *"Mantenimiento Detectivo"* Capítulo 5). Si la falla simultánea, provocada por el modo de falla analizado, puede herir o matar a alguien o causar algún daño en el medio ambiente, entonces la secuencia obliga a descender por la cuarta columna (1B).

Las consideraciones técnicas para las primeras tres preguntas de esta columna son las mismas, sólo que el nivel de riesgo debe reducir la posibilidad de que ocurra la falla simultánea. Si el resultado del análisis arroja que no es posible encontrar tareas a condición (predictivo / proactivo) o tareas preventivas eficaces que, además, reduzcan a niveles de tolerancia el riesgo de falla simultánea, aún queda la opción de efectuar una búsqueda de fallos ocultos (BF en el diagrama).

De la misma forma que en la primera columna del diagrama, y por tratarse de consecuencias que pueden perjudicar la seguridad o el medio ambiente, si no es posible hallar tareas pro-activas, entonces una modificación del activo, procedimientos o métodos, se hace imperativa. Obsérvese que una salida negativa a esta pregunta conduce al *"Rediseño (Obligatorio)"*.

Si, por el contrario, el fallo oculto no es capaz de afectar la seguridad ni el entorno, entonces habrá que preguntarse qué efectos tiene en el sistema o producto. Aquí también caben dos posibilidades. Si la falla simultánea - causada por el fallo oculto analizado - tiene consecuencias económicas mayores que su propia reparación, el descenso obligado es por la quinta columna (2B); si la consecuencia es únicamente el costo de su reparación, entonces se desciende por la sexta y última columna del diagrama (3B). Las sentencias son las mismas en los dos casos, sólo que la justificación económica tendrá en cuenta la consecuencia (económica) de la falla simultánea (incluyendo el costo de su reparación) o el costo de su reparación.

Nota: Para cualquier nivel de tarea seleccionada, siempre cabe la posibilidad que el grupo de trabajo sugiera la necesidad de establecer una recopilación de datos o parámetros de operación que sirvan para evaluar cierta condición particular de desempeño. Esto no significa que dicho registro deba extenderse ilimitadamente en el tiempo; puede solicitarse sólo puntualmente para arribar a alguna conclusión interesante durante la revisión RCM.

Algunas consideraciones adicionales

Los siguientes puntos pretenden agregar algunas consideraciones importantes que no pudieron incluirse en el diagrama de decisión abreviado de la figura 7.2.10.

√ Ninguna tarea de mantenimiento seleccionada por medio del diagrama de decisión, es excluyente con respecto a tareas básicas de lubricación, limpieza, chequeos de recorrida o ajustes menores, en la medida que su aplicación combinada no sea más perjudicial que las consecuencias del fallo que se pretende evitar. Esto significa que se da por válido el aporte, casi siempre positivo, que dichas acciones tienen en la conservación de las funciones de los equipos.

√ Nada impide que antes de comenzar con el primer nivel de preguntas - aquellas referidas al mantenimiento basado en condición (MC) - podamos preguntarnos si no es posible corregir algún procedimiento de operación o mantenimiento que sea el causante del modo de falla estudiado. Dicha acción debe eliminar totalmente la posibilidad de falla.

√ Si bien la combinación de tareas (CT) se propuso únicamente en la primera columna, nada impide que se utilice el mismo criterio en otros sectores del diagrama. Siendo que la efectividad de las tareas de inspección raramente alcanzan el 100%, en ocasiones es posible (y conveniente) aplicar simultáneamente dos acciones. Por ejemplo, podría ser posible, ante una consecuencia del tipo 1B, aplicar tanto una tarea de sustitución junto a una búsqueda de fallos, si entre ambas alcanzan el nivel de riesgo deseado. De todas maneras, siempre debe prestarse especial cuidado en no proponer tareas solapadas que sólo reduzcan el *temor* al fallo, y no el *riesgo*.

√ El RCM prioriza las tareas de mantenimiento a condición (predictivo / proactivo) por sobre las de reacondicionamiento y sustitución programada. Este orden no debe alterarse.

√ Sin perjuicio del punto anterior, podría todavía suceder - sólo para fallos muy particulares - que una tarea de orden inferior sea más ventajosa (técnica y económicamente) que una de orden superior. No hablamos de saltear o eludir sentencias en la secuencia de análisis propuesta por el diagrama (MC, RP, SP, etc.), sino de continuar descendiendo aún habiendo encontrado una respuesta afirmativa en algún nivel superior. Esto dispara la siguiente pregunta: *¿de haber encontrado una tarea técnicamente eficaz y además eficiente, debemos hacernos también las preguntas de orden inferior?* La respuesta, en principio, es no; lo que, por otra parte, queda perfectamente claro en el diagrama si se observan las sentencias de salida. Sin embargo, la experiencia del facilitador y de los integrantes del grupo podrá llevarlos a inferir que, para ciertos casos, convenga analizar la pregunta siguiente aún habiendo salido por **sí** en la anterior. No se trata de una combinación de tareas, sino de optar, por ejemplo, por un reacondicionamiento programado *en lugar* de una tarea condicional siendo ambas factibles y convenientes. Para estas situaciones, muy especiales por cierto, habrá que evaluar cuál de las dos acciones pro-activas es más eficaz y conveniente.

√ Habitualmente se hace difícil encontrar tareas a condición para modos de falla ocultos (de funciones ocultas) dado que sus intervalos Δt_{SF} son, por lo general, pequeños en comparación con los tiempos de stand-by, dentro de los cuales dichas funciones de seguridad deben estar disponibles.

Surge la cuestión de **cómo** tratar la información obtenida del diagrama de decisión.

Se utiliza una *Hoja de Resultados* que contendrá finalmente el Plan de Mantenimiento del activo. La figura 7.2.11 muestra la Hoja de Resultados del ejemplo anterior. Las primeras tres columnas hacen referencia a la *función, falla funcional* y *modo de falla* con las siglas F, FF y MF respectivamente. La columna siguiente identifica el Tipo de Consecuencia (TC) según el criterio adoptado en la tabla de la figura 7.2.9. Por último, la estrategia de mantenimiento escogida (E) aparece antes de las tareas sugeridas para evitar o minimizar cada modo de falla.

La *"cantidad de mantenimiento"* que demanda cada modo de falla depende de la consecuencia que éste es capaz de inducir en el sistema, desde un punto de vista sistémico.

Hoja de Resultados RCM									
Sistema: Producción de SILTRES-XX						Grupo: 4	Facilitador: Perez Ramón	Revisión: 1	
Equipo: Reactor Químico 02R7							Fecha: 12/03/2002		
F	**FF**	**MF**	**TC**	**E**	**Tarea Sugerida**	**Frecuencia Inicial**	**Responsable**	**Especialidad**	**Costo Anual ($)**
1	A	1	2A	RP	Reacondicionamiento y calibración de válvula reguladora de vapor (VAP-02-AU)	Anual	Ingeniería de Mantenimiento	Tercero	$ 1.150
1	A	2	3A	NAP	Se sugiere una revisión de los procedimientos operativos por parte del Responsable de Operaciones.	--	Alvarez Omar	Producción	--
1	A	3	2A	MC	Controlar vibraciones en los rodamientos del motor 02MR7. El parámetro de aceleración RMS debe ser inferior a 0.85.	30 días	Ingeniería de Mantenimiento	Tercero	$ 125
1	A	4	2A	MC	Inspección termográfica del motor 02MR7. Valor máximo tolerado 85 °C.	60 días	Ingeniería de Mantenimiento	Tercero	$ 145
1	A	5	--	--	--	--	--	--	--
1	A	6	--	--	--	--	--	--	--
1	A	7	3A	--	--	--	--	--	--
1	A	8	3A	--	--	--	--	--	--
1	A	9	3A	--	--	--	--	--	--
1	A	10	2A	RP	Inspección visual de los espárragos y eventual reemplazo en caso de deterioro. Confeccionar procedimiento de inspección.	30 días	Rodriguez Alberto	Mecánica	$ 380
1	A	11	2A	NAP	NAP.	--	--	--	--
1	A	12	2A	RP	Prueba hidráulica según recomendación de Ingeniería de Mantenimiento (PROC-ING-12-34).	2 años	Ingeniería de Mantenimiento	Tercero	$ 850
1	A	13	2A	--	--	--	--	--	--
1	A	14	--	--	--	--	--	--	--

Figura 7.2.11
Hoja de Resultados para el mismo ejemplo del reactor.

7.2.4.7 Acciones Pro-activas

Para abordar los criterios de selección relacionados con las acciones pro-activas, referirse a los Capítulos correspondientes.

7.2.4.8 Acciones Reactivas

El concepto de *Ninguna Acción Pro-activa (NAP)* o de *convivencia con la falla*, se aplica sólo para fallos (modos de falla) que nunca perjudicarían la seguridad o el medio ambiente. La cuantificación económica define la no intervención pro-activa para evitar el modo de falla. Si la decisión es dejar en servicio el equipo hasta que se produzca la falla funcional, la organización debe asumir que esto será más conveniente - para cierto intervalo de análisis - que intentar prevenirla. Tal afirmación es válida para el caso de fallos evidentes que, además, no ponen en riesgo la seguridad de personas ni entorno.

La otra acción reactiva importante es el rediseño. El rediseño (físico u operativo) es una opción por defecto; es decir, si no fueron efectivas una o más acciones pro-activas. Es frecuente en el ámbito industrial volcarse al rediseño como primera alternativa para luchar contra los modos de falla. Sin embargo, obsérvese que la metodología RCM prioriza el mantenimiento por sobre el rediseño, por varios motivos.

En primer lugar las reformas llevan mucho tiempo hasta lograr buenos resultados. Además, en la mayoría de los casos se asume (erróneamente) que ya fueron agotadas todas las alternativas para un mantenimiento exitoso. Un ejemplo de ello, y que siempre es bien representativo de la idea, es querer aumentar la confiabilidad del neumático auxiliar de un automóvil instalando uno adicional cuando, en realidad, nada se hace para verificar regularmente si el primero está operativo. Lo que debe asegurarse, en principio, es que la tarea de mantenimiento sea efectiva. Si ello no cubre las expectativas, recién analizar el rediseño.

Otra consideración, tal vez más importante que las anteriores, es que con el afán de corregir un problema se crean otros (nuevos modos de falla) cuyas consecuencias son peores que las del modo de falla que se eliminó. Si bien los diseños originales de los equipos e instalaciones pueden estar lejos de la perfección, no hay muchas razones para creer que lo serán las modificaciones propuestas por Mantenimiento; sobre todo si dichos cambios están ideados por las mismas personas que no pueden combatir los modos de falla con simples tareas de mantenimiento.

Al igual de lo que sucede con el Mantenimiento, un rediseño serio implica comprender cabalmente el proceso de falla para que pueda eficazmente tener algún resultado favorable. Un rediseño no debe basarse en *"tirar tiros al aire"* hasta *pegarle* a la causa, casi por casualidad.

Este tipo de razonamientos - el de volcarse casi inmediatamente al rediseño - se presenta mayormente cuando falla una seguridad o sistema de protección. La tentación inicial es instalar una nueva protección de la protección (*capa superior*); sin embargo, pocos se preguntan si se estaba haciendo algo para verificar que el sistema de protección original estuviese operativo.

7.2.5 Reuniones de Trabajo

Se destacan a continuación algunos conceptos que todo facilitador (y líder de proyecto) debe conocer para liderar reuniones de RCM.

√ Reunir la mayor cantidad de información que permita detallar el contexto operativo, antes de la primera reunión. Revisar esta información junto al grupo de trabajo, tantas veces como sea necesario.

√ Acordar con los integrantes las pautas disciplinarias y de conducta que regirán a lo largo del proyecto de revisión RCM.

√ Al comienzo de cada reunión, repasar rápidamente lo efectuado en la reunión anterior.

√ Evitar las discusiones y el exceso de análisis. Si los integrantes desconocen algún tema puntual, se dejará para ser tratado externamente. De todas formas, un miembro del grupo asumirá la responsabilidad y velará para que el tema sea resuelto satisfactoriamente.

√ Cada miembro del grupo debe contar, en cada reunión, con la última versión de las Hojas de Análisis y/o de Resultados.

√ Asegurar la asistencia de los integrantes a cada reunión. Disponer de un espacio (sala) adecuado y del material de trabajo (planos, manuales, pizarra, hojas de papel, etc.).

√ El facilitador debe guiar al grupo por medio de preguntas y repreguntas. Deberá evitar dar su opinión, esto puede condicionar la participación de algunos integrantes.

√ Evaluar quincenalmente los indicadores de avance del proyecto.

√ Las recomendaciones importantes (sobre todo aquellas que permitirían reducir el riesgo para la seguridad o el entorno) deberán ser comunicadas a la Gerencia inmediatamente.

√ Programar las auditorias (en promedio una cada 4 ó 5 reuniones) con Jefes o Gerentes de Mantenimiento, a los efectos de poner a su consideración las decisiones adoptadas.

√ Luego de la auditoria final o de *cierre*, asegurar que las acciones surgidas (plan de mantenimiento y rediseños), se implementen adecuadamente.

√ No tomar *atajos* cuando se utiliza el Diagrama de Decisión.

√ En la Hoja de Resultados se vuelcan las tareas de mantenimiento propuestas para evitar o minimizar las consecuencias de cada fallo. Si la misma requiere de un instructivo, éste debe ser redactado por un especialista fuera de las reuniones y luego codificado. Es habitual destinar una reunión de trabajo para analizar los procedimiento o instructivos.

7.2.6 Ventajas y Desventajas del RCM

Algunas de las ventajas y desventajas más destacables se listan a continuación.

7.2.6.1 Ventajas

√ Un análisis RCM, con adecuado rigor de análisis, es capaz de identificar más del 95% de los modos de falla de un sistema, y proponer con éxito más del 90% de las estrategias de mantenimiento.

√ Permite determinar qué eventos justifican su ingreso al historial de fallas. Con la revisión de las funciones, los modos de falla y, fundamentalmente, los efectos de los fallos, es más sencillo saber cuáles son aquellos eventos que conviene dar de alta en el histórico de mantenimiento.

√ Los activos físicos analizados bajo RCM demuestran tener un menor riesgo en seguridad y un menor impacto en el medio ambiente.

√ El RCM permite evaluar la necesidad de efectuar mejoras o rediseños que disminuyan el riesgo de falla.

√ En muchos casos, se produce una rápida reducción de los gastos de mantenimiento y un aumento considerable de la confiabilidad y disponibilidad. Se reducen las intervenciones que provocan fallas por mortalidad infantil.

√ Se reducen los tiempos medios de reparación (MTTR) si únicamente se escogen las tareas necesarias para sostener las funciones del equipo.

√ De ocurrir fallas funcionales imprevistas, pueden aplicarse métodos como RCA (Root Cause Analysis – sección 7.3.7) con mayor facilidad que sin una revisión RCM.

√ Aumenta el conocimiento técnico de los integrantes del grupo (*más personas saben más cosas*). Esto mejora la gestión del conocimiento en la organización y la información es compartida por mayor cantidad de personas.

√ Desarrolla un lenguaje técnico común. Hablar de mantenimiento con una formación en RCM otorga ventajas competitivas; se trata de un incentivo de desarrollo personal.

√ Puede calcularse el beneficio que tendrá un análisis RCM, a través del beneficio que aportaría cada modo de falla al sistema productivo global. Hechas algunas revisiones previas de RCM, y tomando como patrón los menores y mayores beneficios de los modos de falla típicos, es posible estimar un valor promedio de beneficio por modo de falla. Si dicho valor se multiplica por la cantidad de fallos posiblemente analizados, sería factible estimar el beneficio total del RCM antes de hacer el análisis.

7.2.6.2 Desventajas

√ La profundidad alcanzada en la definición de los modos de falla, depende del grado de experiencia y capacidad técnica (de diagnóstico) de los participantes. Puede resultar útil apoyarse en herramientas de análisis de causas complementarias como el *Análisis P-M, RCA, técnica del Por qué – Por qué, o el Diagrama Causa – Efecto (Ishikawa).*

√ Si el estudio de los modos de falla no es riguroso, suelen omitirse los potenciales errores humanos. El grupo de revisión tiende a ocultar dichas causas por *falso compañerismo*. No obstante, el método no requiere dar nombres cuando se trata de errores operativos o de mantenimiento.

√ Algunos análisis se hacen muy extensos, por lo que nunca es recomendable revisar varios subsistemas simultáneamente.

√ Otro inconveniente, es manejar la posible relación entre dos o más modos de falla que actúan simultáneamente o consecuentemente (dependencia modal). Normalmente la dependencia modal no es significativa; sin embargo, hay situaciones en las que la consecuencia de un modo de falla, actuando por sí sólo, no es la misma que si el mismo fallo sucede en presencia de otro u otros. Para estos casos, *la suma de los modos de falla* no es necesariamente *la suma de sus consecuencias.*

√ Si la descripción de los parámetros de funcionamiento y el estudio de los modos de falla no son exhaustivos, existe cierta dificultad para identificar y resolver fallas crónicas, sobre todo porque éstas son aceptadas por muchas organizaciones como *normales* debido a que su impacto es recurrente y de poca magnitud por evento. Hay fallas crónicas que no se producen sólo por un modo de falla, sino que requieren una coexistencia con *factores causales*[1]. Un factor causal es cualquier condición presente en el sistema (activo + contexto) que podría o no contribuir a determinada consecuencia. La combinación de RCM con otros métodos como el Análisis P-M, aumenta las posibilidades de eliminar fallas crónicas.

1 Ver Análisis P-M, sección 7.3.6.

7.3 Técnicas de ayuda para el Análisis de Fallas

Algunas de las herramientas que se describen en esta sección sirven, entre otras cosas, para dar soporte al RCM en lo que respecta al estudio de los modos de falla. A su vez, son de gran ayuda para implementar la metodología TPM que se desarrollará más adelante. Otras técnicas, incluso, se utilizan para investigar las causas raíz de una falla, avería o siniestro que se conocen como *análisis pos mortem* o *autopsias de fallas.*

7.3.1 Principio de Pareto

El principio de Pareto[1] establece que, en la mayoría de los casos, un problema es originado por un grupo pequeño de un total de posibles causas. El diagrama que surge como consecuencia de aplicar este principio se denomina Diagrama de Pareto, y permite identificar las causas de mayor importancia y magnitud capaces de provocar el efecto o inconveniente estudiado.

Según este principio, y en cualquier conjunto de elementos, eventos o causas, unos **pocos** factores son **más significativos** que el resto; razón por la cual se los llama **los pocos y significativos**. También conocida como regla del 80-20, asegura que casi siempre existen **pocas** (≈20%) causas que contribuyen **mayoritariamente** (≈80%) a generar el efecto total. A las causas **pocas** y **significativas** se las conoce también como *causas vitales*; dejando el término *causas triviales* para el 80% restante. Así, el 80% de las causas serían responsables de contribuir sólo en un 20% al problema total.

Si trasladamos el principio de Pareto a la industria, podríamos asegurar, por ejemplo, que el 80% de las *pérdidas* de un equipo o instalación serían producidas sólo por el 20% del total posible de causas o modos de falla.

En los análisis de causa - raíz de falla (RCA) es común primero identificar aquellos equipos que causan el mayor perjuicio en la unidad productiva por medio de un diagrama de Pareto. De la misma forma ocurre cuando quiere decidirse qué activos conviene comenzar a revisar con RCM. Téngase en cuenta que las revisiones RCM llevan tiempo y recursos, y toda organización querrá disponer de esos recursos (generalmente escasos) para las instalaciones que más beneficios puedan ofrecer con su mejora.

Un diagrama de Pareto es útil para estudiar fallas *crónicas* (más relacionadas con las oportunidades de mejora que con los problemas). Sin embargo, y bajo ninguna circunstancia, resuelve los problemas; únicamente facilita la selección de las causas que producen el mayor perjuicio.

Los pasos para construir un diagrama de Pareto son los siguientes:

- √ Definir el problema a estudiar, su alcance y los límites del sistema (o proceso).
- √ Escoger una unidad de medida para cuantificar, por igual, el efecto o pérdida de todos los eventos (o causas).
- √ Listar todos los eventos (o causas) y la pérdida parcial con que contribuye cada uno.
- √ Sumar las pérdidas parciales para obtener la pérdida total del conjunto.
- √ Ordenar los eventos (o causas) descendentemente según la pérdida que provoca cada uno.
- √ Calcular el porcentaje que representa cada evento (causa) con respecto al total (100%).
- √ Hacer la suma acumulada de las contribuciones porcentuales, desde la mayor a la menor.
- √ Confeccionar un diagrama de barras con la pérdida de cada evento (o causa) ordenado descendentemente. En el mismo gráfico, y como eje secundario del lado derecho, dibujar una línea cuyos puntos serán los porcentajes acumulados en orden ascendente.
- √ Seleccionar los eventos (o causas) cuya suma acumulada sea igual o mayor al 80% de la pérdida total. El conjunto de tales eventos constituye los **pocos** y **significativos**.
- √ Los planes de acción deben enfocarse, en principio, a eliminar las causas vitales; por último las triviales.

---

1 Wilfredo Pareto (1848 1923). Sociólogo y economista italiano, concluyó que la distribución de la renta en toda sociedad responde siempre a un mismo modelo, por lo que serían inútiles las políticas de redistribución de la riqueza.

Ejemplo 7.3.1

El siguiente ejemplo permite ver el grado de contribución que un grupo de eventos tiene sobre un determinado problema. La tabla 7.3.1 muestra una lista de equipos (o subsistemas) con la cantidad de fallas y los tiempos de detención que provocó cada uno en el sistema productivo en un año. El problema a estudiar es la cantidad total de fallas y el tiempo total de detención que éstas produjeron. Se asume que las fallas funcionales registradas para cada activo, en la columna *Cantidad de Fallas*, afectaron directamente el proceso productivo según el *Tiempo* en minutos que muestra la última columna de la tabla.

#	Equipo/Subsistema	Cantidad de Fallas	Tiempo [min]
1	Quemadores	4	0
2	Bombas Centrífugas	35	120
3	Ventiladores de Extracción	9	40
4	Alimentadores	2	60
5	Bombas de Vacío	2	5
6	Válvulas de Seguridad	0	0
7	Válvulas Neumáticas	28	90
8	Registradores	2	10
9	Golpeadores	2	10
10	Tableros Eléctricos	1	510
11	Motores Eléctricos	19	840
12	Contactores	5	60
13	Accionamientos	1	5
14	Reductores	1	320
15	Acoplamientos	3	30

Tabla 7.3.1
Cantidad de Fallas y tiempos de detención de un conjunto de equipos.

Si se decide confeccionar un diagrama de Pareto por *Cantidad de Fallas*, los pasos indican que debemos ordenar el listado descendentemente según la cantidad de fallas de cada uno. Luego, se suma el total de fallas y se calcula el porcentaje de contribución de cada equipo al total. Finalmente, y en la última columna de la Tabla 7.3.2, se ubica la suma acumulada de los porcentajes.

Análisis por Cantidad de Fallas				
#	Equipo/Subsistema	Cantidad de Fallas	%	% Acumulado
2	Bombas Centrífugas	35	30,7%	30,7%
7	Válvulas Neumáticas	28	24,6%	55,3%
11	Motores Eléctricos	19	16,7%	71,9%
3	Ventiladores de Extracción	9	7,9%	79,8%
12	Contactores	5	4,4%	84,2%
1	Quemadores	4	3,5%	87,7%
15	Acoplamientos	3	2,6%	90,4%
4	Alimentadores	2	1,8%	92,1%
5	Bombas de Vacío	2	1,8%	93,9%
8	Registradores	2	1,8%	95,6%
9	Golpeadores	2	1,8%	97,4%
10	Tableros Eléctricos	1	0,9%	98,2%
13	Accionamientos	1	0,9%	99,1%
14	Reductores	1	0,9%	100,0%
6	Válvulas de Seguridad	0	0,0%	100,0%
		114	100,0%	

Tabla 7.3.2
Orden descendente de los equipos por Cantidad de Fallas y porcentajes de contribución.

Operando análogamente con respecto a los tiempos de detención se obtiene la tabla 7.3.3.

Análisis por Tiempo de Detención				
#	Equipo/Subsistema	Tiempo [min]	%	% Acumulado
11	Motores Eléctricos	840	40,0%	40,0%
10	Tableros Eléctricos	510	24,3%	64,3%
14	Reductores	320	15,2%	79,5%
2	Bombas Centrífugas	120	5,7%	85,2%
7	Válvulas Neumáticas	90	4,3%	89,5%
4	Alimentadores	60	2,9%	92,4%
12	Contactores	60	2,9%	95,2%
3	Ventiladores de Extracción	40	1,9%	97,1%
15	Acoplamientos	30	1,4%	98,6%
8	Registradores	10	0,5%	99,0%
9	Golpeadores	10	0,5%	99,5%
5	Bombas de Vacío	5	0,2%	99,8%
13	Accionamientos	5	0,2%	100,0%
1	Quemadores	0	0,0%	100,0%
6	Válvulas de Seguridad	0	0,0%	100,0%
		2100	100,0%	

Tabla 7.3.3
Orden descendente de los equipos por Tiempo de Detención y porcentajes de contribución.

Los diagramas de Pareto por Cantidad de Fallas y por Tiempo de Detención obtenidos a partir de las tablas anteriores, se observan en las figuras 7.3.1 y 7.3.2 respectivamente.

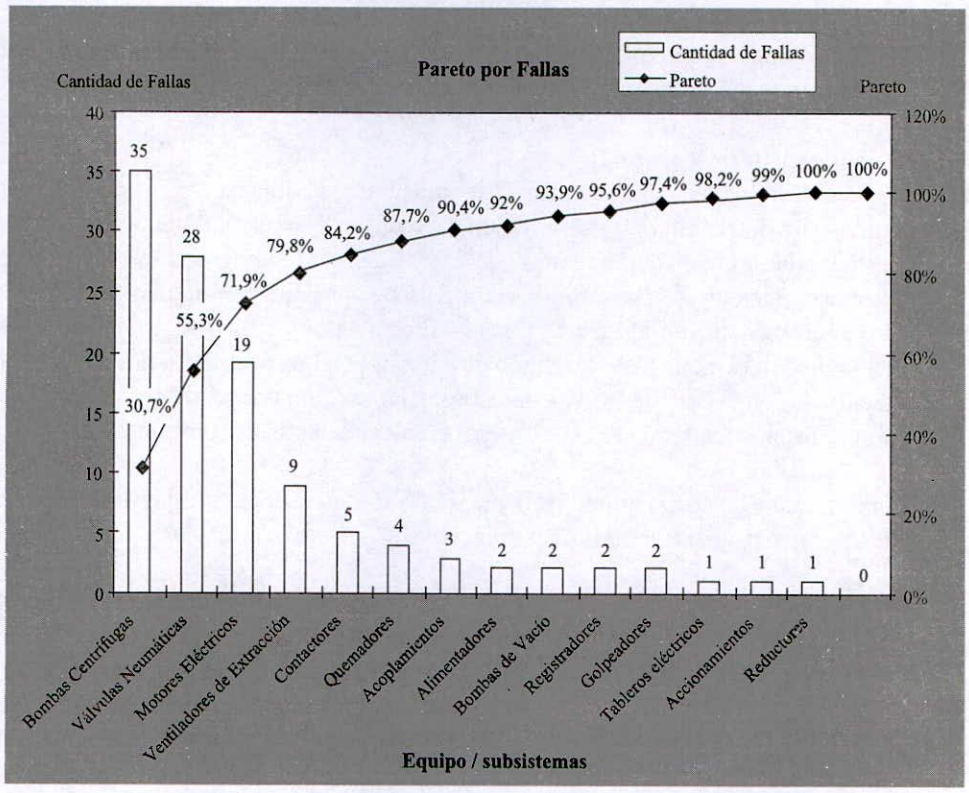


Figura 7.3.1
Pareto por Cantidad de Fallas.

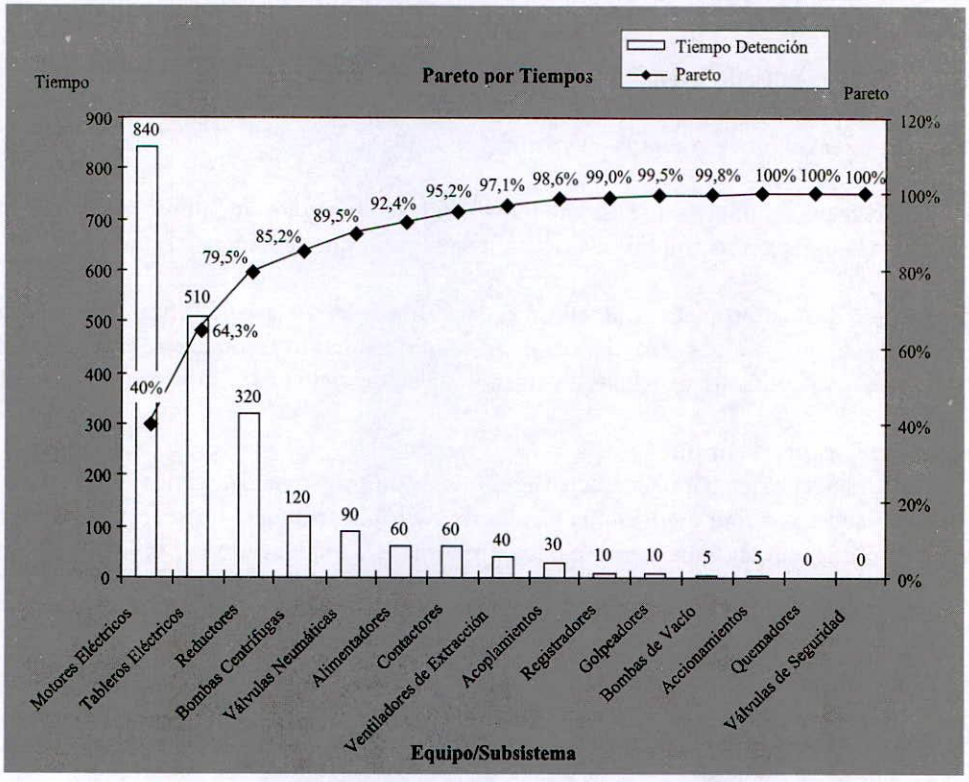


Figura 7.3.2
Pareto por Tiempos de Detención.

Son 4 los equipos (26,7%) **pocos** y **significativos** (vitales) que provocan la mayor cantidad de fallas (79,8%); *bombas centrífugas, válvulas neumáticas, motores eléctricos* y *ventiladores de extracción.* A su vez, otros 3 equipos (20%) generan el mayor tiempo de detención (79,2%); *motores eléctricos, tableros eléctricos* y *reductores.* Obsérvese que los motores eléctricos son los únicos equipos que se encuentran en ambos grupos.

Podemos concluir, entonces, que un análisis de estas características permite identificar los equipos causantes de la mayor parte del problema y actuar en consecuencias.

7.3.2 Tormenta de Ideas (Brainstorming)

Una *tormenta de ideas* [1] es una herramienta grupal de trabajo que se aplica corrientemente – y a veces inconscientemente – para determinar las causas de un problema o plantear las que podrían provocarlo. Es un proceso participativo y creativo que se nutre del conocimiento (e imaginación) de los integrantes de un grupo de trabajo. Suele utilizarse como herramienta de aproximación inicial para listar modos de falla en RCM o para construir un Diagrama Causa – Efecto (sección 7.3.4). También se utiliza para evaluar la dispersión de criterios que tiene un grupo de personas con respecto a un mismo tema. El líder del grupo – un facilitador en el caso de RCM – debe propiciar un clima distendido y participativo.

A continuación se listan sucintamente los pasos para llevar adelante una tormenta de ideas.

√ Designar un moderador de grupo quien se encargará de anotar las ideas propuestas por los participantes. Puede ayudarse de pizarras o láminas colgantes.

√ El grupo debe permanecer en silencio entre 5 y 15 minutos aproximadamente, pensando y anotando las ideas en sus cuadernos.

√ Habiendo establecido un orden, cada miembro propone una idea por vez en forma clara y sencilla; no se permiten críticas ni comentarios. El moderador anota la idea en el lugar designado para tal fin y visible para todos. No se discuten las ideas propuestas; en esta instancia se busca cantidad de ideas y no calidad.

√ Evitar las ideas repetidas. Aún con redacciones diferentes, dos ideas pueden significar lo mismo.

√ Cuando los participantes no tengan más ideas para sugerir, se comienza la aceptación o rechazo de cada una. La aceptación de cada idea es a través de una votación o breve discusión entre los miembros. Éste debe ser un proceso rápido y expeditivo.

√ Si la validación técnica y final de una idea no puede ser resuelta por los miembros del grupo, el moderador debe trasladarla a otro ámbito de discusión y asegurar que se trate correctamente.

La combinación de una tormenta de ideas con el diagrama de Pareto, es muy eficaz. Si el grupo puede cuantificar el impacto que produce cada una de las causas que resultaron aceptadas, se está en condiciones de obtener las **pocas** y **significativas** (vitales), y trazar un plan de acción para comenzar a resolverlas.

7.3.3 Técnica del Por qué – Por qué

Es muy conocido el hecho que para llegar a la causa raíz de un problema da buenos resultados preguntarse, al menos, 5 sucesivos ¿por qué? Es una técnica de fácil aplicación y se utiliza principalmente para análisis simples o iniciales, aunque siempre debe procurarse la evidencia que ratifique la respuesta a cada pregunta. También se denomina técnica de los **5 por qué**.

En sus comienzos, la metodología TPM (ver sección 7.4) la utilizó como único método para diagnosticar fallas con consecuencias significativas. Sin embargo, y conforme se desarrollaron otros métodos, se fue reemplazando y hoy puede decirse que constituye una herramienta de otras herramientas de diagnóstico. Para problemas complejos resulta ser un complemento de los diagramas causa – efecto (Ishikawa), los análisis causa – raíz de falla (RCA) o los análisis PM (Physical Mechanism).

---

1 En Ingles, Brainstorming.

Cuando el nivel de deterioro del activo es muy avanzado es suficiente con aplicar la técnica de los 5 por qué. Sin embargo, cuando los beneficios de mejora son marginales, deberá usarse como apoyo de otras técnicas de mayor potencia analítica como las mencionadas.

El proceso deductivo que propone el método de los 5 por qué, se materializa por medio de una planilla de registro como la mostrada en la figura 7.3.3. En ella se vuelcan primero los datos de cabecera junto a una breve descripción del fenómeno. Luego, hay 5 niveles o rondas de *por qué*. El primero (1° Nivel) debe dar respuesta al fenómeno enunciado en los datos de cabecera identificando la posible causa. Si a través de su evidencia una respuesta resultar afirmativa, se vuelve a cuestionar en el nivel siguiente **por qué** pudo haber ocurrido, y así sucesivamente.

Se considera un método lineal porque, en la práctica, hay cierta tendencia a postular una sola respuesta para cada pregunta; vale decir, una sola causa. No obstante, las versiones más actualizadas mejoran o minimizan este inconveniente.

Otro problema que debe evitarse es tomar como cierta una respuesta sin antes obtener la evidencia o la verificación de campo (*in situ*). Algunas personas, incluso, caen en la equivocación de ajustar el análisis hacia una causa que, de antemano, piensan es la verdadera causa raíz del problema. Este accionar tendencioso no arroja ningún beneficio a la eliminación de la causa raíz verdadera.

Su ventaja más importante es la versatilidad, pudiéndose aplicar en infinidad de temas inclusive fuera del ámbito industrial.

Hoja de Análisis POR QUÉ - POR QUÉ				
Sistema:	Lavado	**Coordinador:**	Perez Alberto	
Equipo / Subsistema:	Bomba alimentación de agua.	**Fecha del Análisis:**	21/02/2003	Revisión: 1

Descripción del Fenómeno:	El día 19/02/2003 en horas de la noche (23:30) la bomba P2.5 dejó de enviar agua al depósito superior T2.8. Se puso en funcionamiento la bomba alternativa P2.6 y los mecánicos de guardia desmontaron y enviaron la bomba al taller mecánico para su reparación.	Observaciones:

#	1° Nivel de ¿Por qué?	Sí/ No	2° Nivel de ¿Por qué?	Sí/ No	3° Nivel de ¿Por qué?	Sí/ No	4° Nivel de ¿Por qué?	Sí/ No	5° Nivel de ¿Por qué?	Sí/ No
A	Porque el impulsor está desgastado.	No								
B	Porque el motor eléctrico está quemado.	No								
C	**Porque actuó el protector de sobreintensidad.**	**Sí**	**Porque el rodamiento de la bomba lado acoplamiento está engranado.**	**Sí**	Porque el rodamiento está contaminado con agua.	No				
D			Porque falló el protector de sobreintensidad.	No	Porque el rodamiento está contaminado con sólidos.	No				
E			Porque ingresó material extraño por la admisión.	No	**Porque el rodamiento no está debidamente lubricado.**	**Sí**	Porque posee insuficiente cantidad de lubricante.	No		
F					Porque el rodamiento está con exceso de lubricación.	No	**Porque el lubricante no es apropiado para esta aplicación.**	**Sí**	**Porque los dispositivos cargadores no están identificados por tipo de lubricante.**	**Sí**

Figura 7.3.3 Ejemplo de Planilla de Análisis Por qué - Por qué.

El cuestionamiento debe darse por terminado cuando la(s) causa(s) que surja del análisis ya no pueda ser manejada por Mantenimiento o por la organización en su conjunto.

Por su puesto, no existe una cantidad fija de **por qués**, pudiéndose formular más de cinco.

7.3.4 Diagrama Causa - Efecto (Diagrama de Ishikawa[1])

Un diagrama Causa - Efecto permite visualizar rápidamente aquellas causas (modos de falla) que podrían derivar en una falla funcional (efecto) de un sistema complejo. Un equipo puede fallar por varias razones, e incluso algunas de ellas estar relacionadas entre sí.

Para confeccionar un diagrama Causa - Efecto participa un grupo de personas lideradas por un moderador. En los análisis RCM, que requieren mayor profundidad en sus modos de falla, aparece como una de las herramientas que brinda los mejores resultados. Las mismas personas (y el facilitador) que conforman el grupo de revisión RCM pueden confeccionar un diagrama de Ishikawa. Construir un diagrama efectivo no es sencillo. Lleva tiempo, esfuerzo y debe asegurarse un ámbito adecuado que propicie el trabajo en equipo y la participación de todos los integrantes.

Para fallas funcionales simples es suficiente un análisis *por qué - por qué* o una *tormenta de ideas*; sin embargo, si la falla funcional está relacionada con varios modos de falla, se hace necesario utilizar un diagrama de Ishikawa.

Para construir el diagrama se comienza definiendo brevemente el efecto (falla funcional), y se lo ubica dentro de un rectángulo a la derecha o izquierda del esquema. Luego, un eje central canaliza el aporte de las posibles causas que, a su vez, se agrupan según características; estos grupos se denominan *factores*. Existen distintas versiones o categorías en función de las características del problema; las más difundidas utilizan los siguientes factores:

- √ **Categoría A**: Método - Máquina - Materiales - Mano de Obra.
- √ **Categoría B**: Posición - Procedimiento - Persona - Política.
- √ **Categoría C**: Contexto - Proveedor - Sistema - Destreza.

De cada factor "cuelgan" las causas primarias, dentro de las cuales se encontrarán las causas raíz. Para problemas relacionados con fallas de equipos, se prefiere dividir las causas en los factores que sugiere la categoría A. Si se trata de un problema de procesos, es más apropiado utilizar la categoría B. Por último, para inconvenientes logísticos, administrativos o de servicios, la categoría C. No obstante, puede optarse por una combinación de factores.

Por ejemplo, nada impide que en la categoría A se incluya el factor *Contexto* (propio de la categoría C) para tener en cuenta las causas externas que condicionan la operación del equipo (ver sección 1.1.1 "Hipótesis del Contexto") según ilustra la figura 7.3.4.

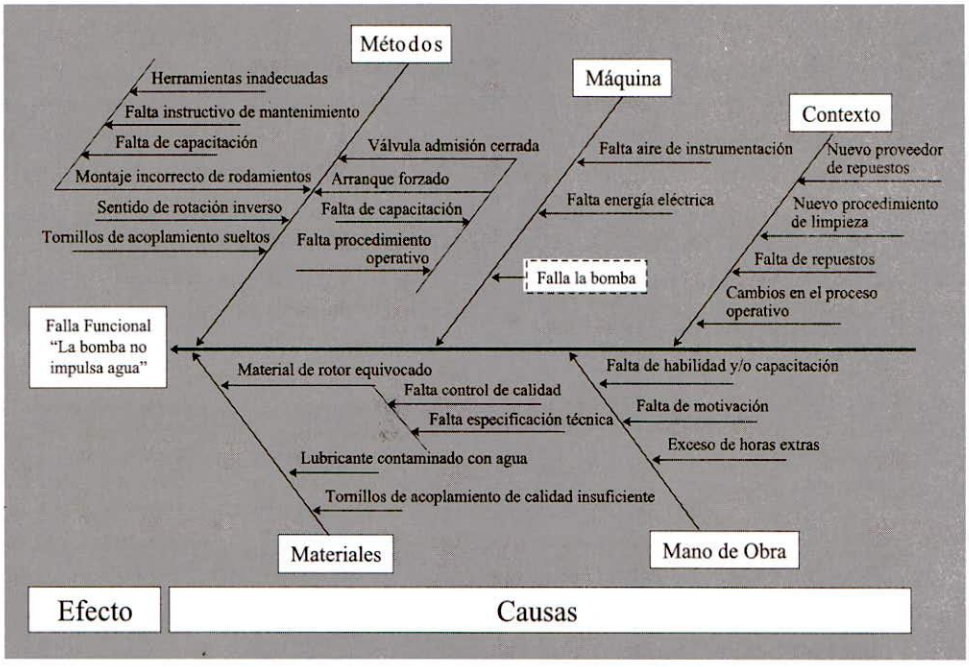


Figura 7.3.4 Diagrama Causa - Efecto (Ishikawa) para la Falla Funcional.

1 En 1953 el Dr. Kaoru Ishikawa, siendo profesor de la Universidad de Tokio, presentó esta forma de estudiar problemas complejos. También se lo conoce como diagrama "Espina de Pez" por su forma característica.

Sin embargo, las categorías mencionadas no son excluyentes, el facilitador podrá escoger un conjunto particular de factores que represente mejor a las necesidades del estudio.

Cuando se presume que una causa es consecuencia de un conjunto de otras causas, se resuelve haciendo un segundo diagrama para dicha causa transformándose ésta en el nuevo efecto. La categorización en esta segunda fase puede ser distinta, por ejemplo, por motivos. Los motivos más comunes para Mantenimiento son: mecánico, eléctrico, hidráulico, neumático, instrumentación, etc.

A modo de ejemplo, y continuando con el esquema anterior, la figura 7.3.5 muestra un diagrama causa – efecto sólo para la causa "Falla la bomba" (ver recuadro punteado en la figura 7.3.4).

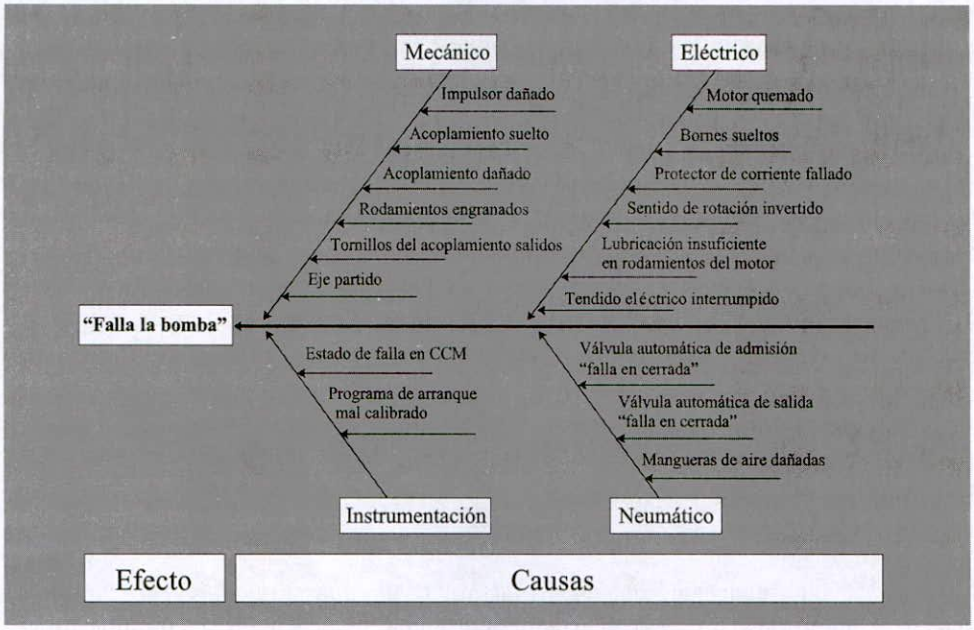


Figura 7.3.5 Diagrama Causa – Efecto (Ishikawa) para el nuevo efecto "Falla la bomba".

Aquí, la causa *"Falla la bomba"* pasa a ser el nuevo efecto del que se desprende un conjunto de probables causas o modos de falla.

Podemos concluir que para confeccionar un diagrama de Ishikawa el grupo propone y discute las causas ubicándolas según el factor correspondiente, para lo cual suele utilizarse una *tormenta de ideas*. La falla funcional estudiada (efecto en el diagrama de Ishikawa) debe describirse claramente en relación a la función que se pierde; un bajo nivel de detalle obliga a que los analistas evalúen gran cantidad de causas que no son inherentes a la falla. Inicialmente cada línea, correspondiente a un factor, mostrará múltiples causas. Sin embargo, cuando el diagrama se somete a una depuración analítica se eliminan algunas causas que, en rigor, pueden ser efecto intermedio de otras, quedando solamente las causas raíz. Con ayuda de un Diagrama de Pareto pueden identificarse aquellas causas que provocan el mayor impacto en la falla funcional.

Todo diagrama de Ishikawa debe contar, además, con la siguiente información de cabecera: fecha del análisis, grupo, facilitador o moderador, sector, sistema, equipo, descripción de la función y de la falla funcional o efecto estudiado.

7.3.5 Técnica de las 5W + 1H y el Análisis de Fallas (ADF's)

La técnica de las 5W + 1H es sencilla y consiste en responder una serie de preguntas cuyas respuestas facilitan la descripción de un problema, falla o evento acontecido. Junto al método RCA se consideran técnicas *pos-morten* porque si bien no sirven para evitar lo sucedido, pueden ayudar a minimizar su recurrencia (ver sección 7.3.7).

Las palabras que dan origen a su nombre, y en las que se basa el método, son:

√ **Qué** (**W**hat): Se pretende saber cuál es el efecto concreto durante la eventualidad. *¿Qué sucede cuando se manifiesta?, ¿cuál es el problema que se observa?* Ejemplos: el equipo detiene su marcha, salen productos defectuosos, se rompe algún elemento, etc.

√ **Cuándo** (**W**hen): *¿Cuándo se produce el problema, en qué ocasiones sucede?* Ejemplos: durante la puesta en marcha, durante un cambio de formato o calibre, durante algún turno en particular, luego de una intervención de mantenimiento, cuando hay un cambio en las materias primas, cuando cambia el proveedor, cuando cambia el operador de la máquina, cuando se hace el relevo de personal por almuerzo, etc.

√ **Dónde** (**W**here): *¿Dónde se observa el problema o efecto desfavorable?* Debe hacerse una declaración específica del lugar de la máquina en la que ocurre. Ejemplos: en la salida del equipo, en la succión de la bomba, en el retorno de la cinta, en los elementos de desgaste, en el accionamiento, después de la válvula, etc.

√ **Quién** (**W**ho): La cuestión es evidenciar si el problema se relaciona con la habilidad de ciertas personas. Bajo ningún motivo tómese esta pregunta para hallar culpables; sólo pretende detectar los factores que puedan ayudar a describir el fenómeno de manera objetiva. *¿Quién opera el equipo cuando ocurre el problema, quien realiza tareas de mantenimiento previas a su manifestación?* Ejemplos: durante el Turno "X", cuando los cambios de formato se hacen con alguien en particular, cuando la máquina es operada con personal de relevo para el almuerzo, etc.

√ **Cuál** (**W**hich): Aquí nos preguntamos, *¿cuál es el patrón con que se observa el problema, es una tendencia de repetición aleatoria o presenta algún patrón definido?* Ejemplos: el fenómeno aumenta con las horas de marcha, se incrementa a lo largo de la semana, ocurre más frecuentemente al fabricarse determinado producto, etc.

√ **Cómo** (**H**ow): *¿De qué forma se aparta la situación actual de la ideal, cómo se manifiesta el fenómeno?* Ejemplos: el defecto se manifiesta como irregularidades en la superficie de la pieza, con un cambio de color y textura, la etiqueta queda mal pegada, el producto sale con bajo contenido, la bolsa queda abierta, etc.

Obsérvese que las respuestas a estas preguntas permiten describir con mayor exactitud el fenómeno. En el ámbito del Mantenimiento suele combinarse la técnica del **Por qué - Por qué** con las **5W + 1H**, a través de una planilla de trabajo denominada **Planilla de ADF** (ver Anexo VII). En la página siguiente se muestra el uso de una Planilla de ADF para estudiar la causa de falla (y evitar su recurrencia) en un elevador a cangilones.

GRANOS DEL SUR MOLIENDA	Análisis de Falla (ADF)	Código	MO-EC-06
		Revisión:	2
		Fecha:	18/02/2003

ADF N°: 06 — Máquina / Subsistema: Elevador a Cangilones

PRODUCCION

¿Qué sucedió?	Se interrumpió el proceso de almacenamiento de granos. Se rompió la cadena del elevador a cangilones, acumulándose excesiva cantidad de producto en la parte inferior del elevador.
Parte del Equipo:	Sistema de Transporte (elevación)
Problema:	Se cortó la cadena del elevador.

Modo: ■ Accidental ☐ Repetitivo

¿Cómo se detectó el problema?

■ Ruido ☐ Juego / Desgaste ☐ Alarmas
■ Vibración ☐ Pérdidas / Fugas ☐ Suciedad
☐ Temperatura ☐ Corrosión ☐ Fricción
■ Otros

¿Cuánto duró?

	FECHA:	HORA:
Inicio del Problema	03/02/03	2:30
Puesta en Marcha	06/02/03	9:45
Tiempo de Reparación (min.)		---

¿Quiénes Intervinieron?

Detectores:	Reparadores:
El Supervisor de turno de Operaciones (Ramirez A.) y el Operador (Alvarez O.)	Personal de Mantenimiento durante toda la reparación.
	Los trabajos de reparación se iniciaron el 03/02/2003 a las 07:30.

Reparadores Inmediatos

Documentación de la Falla (Esquema ó Dibujo)	¿Qué puntos se examinaron?	Resultado de lo examinado	¿Qué acciones se tomaron?
	En la madrugada del 03/02/2003, luego de la detención del elevador, se observó gran acumulación de granos en la parte baja del elevador (sótano). La acumulación excesiva de granos traba los baldes del elevador y cortar la cadena. Se examinó la protección térmica del motor eléctrico verificándose que no estaba operativa.	La zona inspeccionada se encontraba llena de granos, se encontraron dos eslabones de la cadena fracturados y los soportes (respaldos) de un balde decabezados.	La funcionalidad del sistema no pudo reponerse inmediatamente. Se pidió desconexión eléctrica y se avisó a la guardia de Mantenimiento. Se interrumpió el proceso de elevación de granos.

¿Ocurrió en otras oportunidades? Si/No	Si	¿Con qué frecuencia ocurre?	Hace 2 años.

¿Quiénes intervendrán en el Análisis?	¿Cuándo se analizará?
Un especialista mecánico, un especialista eléctricista, dos Supervisores y el Ingeniero de Mantenimiento de Planta.	A partir del 03/02/2003

MANTENIMIENTO

Descripción del Fenómeno : 5W + 1H		Resumen del FENÓMENO
¿Qué?	Se cortaron eslabones de la cadena de elevación.	El proceso de elevación se detiene porque se corta la cadena del elevador (se encontraron dos eslabones fracturados). El fenómeno ocurrió en horas de la noche con producto proveniente de Bahia Blanca. La acumulación de granos en la parte de carga de los baldes es algo que los Supervisores de Producción observan con frecuencia.
¿Cuándo?	Durante la descarga de camiones provenientes de Bahia Blanca.	
¿Dónde?	En la cadena del sistema de elevación. (eslabones y baldes).	
¿Quién?	Durante el turno noche.	
¿Cuál?	Según datos obtenidos, la acumulación de granos en la zona de carga de los baldes sucede frecuentemente.	
¿Como?	Se pudo comprobar gran acumulación de granos en la zona de carga de los baldes. Al cortarse la cadena, se desprende de las guías y cae hasta el zótano de granos.	

BÚSQUEDA DE LAS CAUSAS RAÍZ (Ronda de Por qués)

PARTES DE LA MAQUINA y ASPECTO HUMANO

1° ¿POR QUÉ ?	2° ¿POR QUÉ ?	3° ¿POR QUÉ ?	4° ¿POR QUÉ ?	5° ¿POR QUÉ ?	Causas Raiz
Porque el tornillo de alimentación entrega más producto que el que es capaz de evacuar el cangilón.					
Porque los dos (2) rodamientos de la rueda de retorno (parte inferior del sistema) están engranados y se frena la cadena.	**Porque los rodamientos están contaminados con polvo y tierra.**	**Porque están dañados los retenes de los rodamientos.**	**Porque los dos últimos trabajos programados de sustitución cíclica de los rodamientos no fueron efectuados. (Existe un Trabajo Programado en el sistema informático de Mantenimiento con frecuencia semestral para el reemplazo de ambos rodamientos.**	**Porque el área de programación no emitió los trabajos programados.**	**En el último año la dotación asignada a la programación del mantenimiento se redujo. No pudieron programarse algunos trabajos preventivos, principalmente en el transporte de materias primas.**
Porque se suelta algún balde en el recorrido del cangilón y se engancha con la guía portacadena.	Porque los rodamientos tienen lubricación insuficiente.	Porque cambió el contexto operativo del elevador.	Porque los retenes no son los recomendados para esta aplicación específica.		
	Porque los rodamientos no son los especificados por el fabricante.				
	Porque los rodamientos perdieron la lubricación.				

ACCIONES PARA QUE NO VUELVA A OCURRIR

¿Cómo ?	¿Cuál? Nombre	¿Cuál? Código (si aplica)	Responsable	Fecha de cumplimiento	Fecha Real de cumplimiento
Acciones inmediatas	Se reemplazaron los dos (2) rodamientos y se reparó la cadena del cangilón. Se hizo una limpieza profunda del sistema y se reemplazaron los baldes dañados.		Supervisor de Mantenimiento Mecánico.	06/02/2003	06/02/2003
Mejoras al diseño	Se instalará una unidad electrónica de monitoreo para el consumo eléctrico del motor. Esto permitirá que el sistema de control detenga el funcionamiento del motor cuando el consumo llegue a 28 A. El consumo en vacío es de 21 A y con carga de 26 A.		G. Larreta	01/04/2003	24/03/2003
	Se instalarán rodamientos para relubricación a través de un sistema centralizado (mangueras y alemites). Actualmente los rodamientos son blindados sin necesidad de relubricar.		A. Pascuali	01/04/2003	12/03/2003
Nuevos instructivos, OPL's, actividades o planes de capacitación.	En el proceso de descarga de camiones de granos debe incluirse que el sistema puede detenerse automáticamente para seguridad del activo.	PR-P-ELE-02	R. Perez	01/04/2003	27/03/2003
Otros sistemas donde es posible la replicación del aprendizaje.					
Inversiones / Proyectos necesarios	Compra del sistema automático de monitoreo de corriente.		G. Larreta	01/04/2003	20/03/2003
Otras acciones necesarias					

Cierre del ADF (Fecha y Firma de los Responsables)	El ADF se considera cerrado habiéndose cumplido las acciones necesarias para evitar la recurrencia (27/03/2003).

Figura 7.3.6
Ejemplo de Planilla de ADF para un elevador a cangilones.

7.3.6 Análisis P-M (Physical Mechanism)

Las fallas funcionales crónicas se caracterizan por ser de alta repetibilidad y por provocar, cada vez que suceden, un impacto de consecuencias no mayores. Si la consecuencia de cada falla crónica fuese grave, decididamente la organización no podría tolerar tal situación y la habría corregido oportunamente. Sin embargo, tomadas conjuntamente, y a través de cierto horizonte de análisis, producen grandes perjuicios económicos (o de cualquier otra índole) y representan una oportunidad de mejora considerable. Incluso en muchos casos, y bajo cierta resignación colectiva, terminan asumiéndose como "*normales*". Una característica adicional de las fallas crónicas es la complejidad que significa identificar las causas que las producen; es decir, comprender el proceso causa - efecto que las gobierna.

7.3.6.1 Descripción y Alcance del Análisis P-M

El Análisis P-M[1], también conocido como *método de los principios físicos*, es un procedimiento laborioso pero eficaz para examinar y resolver fallas crónicas. A través de un estudio profundo del **cómo** los fenómenos físicos que ocurren sobre los componentes pueden concatenarse y derivar en la falla funcional, es factible acercase a la meta del **cero defecto**. La visión del cero defecto en la gestión de mantenimiento se profundiza en la sección 7.4.

A diferencia de otros métodos selectivos o de priorización, un Análisis P-M propone estudiar **todas** las causas y potenciales factores que hacen posible la falla o defecto de proceso. Esta herramienta, usada adecuadamente, brinda las condiciones para descubrir y eliminar pérdidas crónicas complejas en forma definitiva.

Un Análisis P-M no impide aplicar simultáneamente otros métodos; por el contrario, es muy útil para apoyar herramientas de decisión como el RCM en la definición de los modos de falla. Por ejemplo, con un Diagrama de Ishikawa pueden solucionarse inicialmente las fallas esporádicas y de gran impacto eventual; luego, las causas de falla más complejas puede estudiárselas con esta metodología de mayor focalización.

Se requiere paciencia, esfuerzo, conocimiento y persistencia. Un análisis P-M insume gran cantidad de recursos, por lo que resulta más eficiente aplicarlo en equipos o subsistemas cuyas fallas crónicas perjudican seriamente los beneficios de la compañía. Las personas involucradas en el estudio deben tener conocimientos mínimos de física, química, matemática y especialidades como termodinámica, mecánica, mecánica de fluidos, estabilidad, óptica, resistencia de materiales, etc.

El análisis permite comprender totalmente el mecanismo progresivo de una falla. Las razones y la manera (el *cómo*) en que un modo de falla culmina en una falla funcional, dependen tanto del equipo como del contexto operativo. El contexto operacional juega un rol fundamental en un análisis P-M porque muchos mecanismos de falla están ligados directamente con los agentes externos del sistema. Un análisis P-M busca precisión en la definición del proceso de la falla, lo que en definitiva permite adoptar las medidas (estrategia de mantenimiento o rediseño) que puedan eliminar completamente la falla funcional crónica.

7.3.6.2 Pasos para desarrollar un Análisis P-M

Los especialistas recomiendan que los Análisis P-M se desarrollen paso a paso según muestra la tabla 7.3.4. Los primeros pasos sirven para comprender el funcionamiento del sistema y el fenómeno físico que en él ocurre, para evaluar la situación operativa de cada elemento y para entender el mecanismo que conduce a la falla. En los pasos intermedios se establecen las condiciones óptimas de operación y se cuantifican los defectos (desvíos); es decir, la diferencia entre lo que el equipo hace y lo que debería hacer. En los últimos pasos se proponen alternativas concretas de mejora para eliminar las causas, y se evalúan los resultados alcanzados. También, se sugiere aprovechar los beneficios del análisis en otras aplicaciones técnicamente comparables.

---

1 Muchos de los conceptos para desarrollar esta sección están basados en la obra "P-M Analysis - An Advanced Step in TPM Implementation" de los autores Kunio Shirose, Yoshifumi Kimura y Mitsugu Kaneda. Ver Bibliografía.

Pasos de un Análisis P-M	
Paso	**Descripción**
1	**Comprender el fenómeno físico** e identificar las anormalidades. Establecer los límites y el alcance del estudio.
2	**Efectuar un análisis físico** de la operación y de las anormalidades (defectos).
3	**Examinar todas las condiciones** inherentes al sistema y al contexto, que contribuyen potencialmente con las anormalidades.
4	**Estudiar las causas** capaces de provocar las anormalidades.
5	**Establecer condiciones óptimas de funcionamiento** de acuerdo a estándares definidos como necesarios y deseados entre Mantenimiento y Producción.
6	**Medir cada causa de anormalidad** de manera objetiva y aplicando la observación en campo.
7	**Determinar las anormalidades** a corregir.
8	**Proponer e implementar acciones de mejora** para cada anormalidad y evaluar los resultados.
9	**Replicar la solución** en sistemas que sean técnicamente comparables y sobre los cuales convenga aprovechar los hallazgos*.

* *Toda replicación debe ser hecha bajo un proceso controlado; cualquier cambio de contexto operativo puede invalidar completamente los resultados buscados.*

Tabla 7.3.4
Pasos necesarios para efectuar un Análisis P-M.

Paso 1. Comprender el fenómeno

Como se dijo, este primer paso tiene como finalidad entender el funcionamiento de la máquina (sistema) y reunir las evidencias suficientes para identificar las anormalidades. El problema en cuestión – que además es parte del fenómeno físico estudiado – siempre debe observarse en campo durante la operación. Nada mejor que observar el fenómeno en "*el lugar del hecho*". Encontrarse en el sitio adecuado cuando se manifiesta el problema, despeja conjeturas e hipótesis preconcebidas. Incluso conviene estar presente en intervenciones de mantenimiento, durante una puesta en marcha o en las etapas de limpieza.

Cabe recordar, una vez más, que la experiencia de las personas es tremendamente valiosa para proponer hipótesis de falla; sin embargo, sólo la comprobación en campo puede validarlas y determinar cuál de ellas es verdadera. En un Análisis P-M – como en cualquier otro análisis – deben evitarse las suposiciones. Únicamente las consideraciones objetivas pueden marcar la diferencia entre el funcionamiento normal y el funcionamiento anormal o defectuoso.

En este primer paso se debe establecer clara y objetivamente la diferencia entre la situación normal (producto de calidad aceptada) y la situación anormal (producto defectuoso).

Para asegurar que el fenómeno físico se ha comprendido cabalmente es preciso describirlo. Si la descripción es breve pero explícita puede asumirse, casi con seguridad, que se comprende. La técnica de las 5W + 1H (sección 7.3.5) ayuda a no omitir datos de importancia.

Paso 2. Efectuar un análisis físico

Los creadores de la metodología consideran decisivo este paso. El *análisis físico* debe explicar **cómo** sucede el fenómeno y las anormalidades (fallos, defectos o pérdidas) sin importar, por el momento, las respuestas al **por qué**.

Las partes componentes de una máquina interactúan entre sí y con el contexto operativo. La forma en que éstas se relacionan permite comprender **cómo** ocurren los defectos. El progreso de un defecto (o mecanismo de falla) es único para cada análisis P-M.

La metodología propone los siguientes cuatro pasos para efectuar un análisis físico adecuado.

√ Estudiar objetivamente los principios básicos de funcionamiento.
√ Entender los procedimientos de operación del sistema.
√ Evaluar cómo se relacionan los elementos para propiciar el problema.
√ Cuantificar los cambios físicos que se producen cuando ocurre la anormalidad.

El grupo de trabajo podrá valerse de esquemas, planos, diagramas, especificaciones técnicas o procedimientos para entender el comportamiento del sistema. Además, deben identificarse aquellos elementos (o factores) que causan o ayudan a causar las anormalidades.

El último de estos cuatro pasos -*cuantificar los cambios físicos*- es muy importante, porque mide las variables físicas obligando a establecer y utilizar un único criterio. Las magnitudes físicas escogidas deben ser de fácil medición, y el valor (o rango) de referencia debe ser aceptado por todos los miembros del grupo.

Paso 3. Examinar todas las condiciones

Aquí se analizan **todas** las condiciones que, con buen grado de factibilidad, están relacionadas con la anormalidad. Habitualmente se usa una serie de diagramas de Ishikawa.

Un primer diagrama permite comprender la relación entre el problema (efecto) y los distintos mecanismos. Si el sistema es complejo puede ser necesario desarrollar sucesivos diagramas para cada subsistema y hasta para cada componente. Esta primera etapa, dentro del paso, permite identificar la relación entre cada elemento del sistema y la anormalidad estudiada.

Posteriores diagramas se usan para identificar el resto de las condiciones de contexto que contribuyen potencialmente con el problema como por ejemplo: procedimientos operativos o de mantenimiento, controles de calidad, procedimientos de almacenaje o transporte, etc.

Paso 4. Estudiar las causas

En este paso se buscan las relaciones *causa - efecto* potencialmente capaces de provocar los desvíos del sistema aplicando, por ejemplo, la categoría A del diagrama de Ishikawa (Método, Máquina, Materiales y Mano de Obra).

En adelante, las anormalidades, desvíos, defectos o fallas funcionales serán el *efecto* en los diagramas de Ishikawa. Es posible que en los primeros diagramas sólo se identifiquen algunas causas intermedias, por lo que cada una deberá analizarse con un nuevo diagrama hasta llegar a las causas raíz. Se constituirá, de esta forma, un *árbol de diagramas* que redundará en un mejor conocimiento del sistema por parte de los miembros del grupo de trabajo.

Obsérvese que si se hace un paralelismo con la metodología RCM, en definitiva lo que se obtiene con este paso son los modos de falla del sistema. Por tal motivo, caben las mismas recomendaciones a la hora de describir las causas raíz (modos de falla) que las mencionadas en la sección referida al RCM. Esto significa que para describir las causas en los diagramas de Ishikawa deben evitarse las redacciones generales como *"falla el rodamiento"* o *"sensor mal calibrado"*. En su lugar es conveniente expresar, *"rodamiento montado con una tolerancia superior a h7"* o *"sensor ubicado a más de 1 cm de la cinta"*.

Identificar y estudiar **todas** las posibles causas de un problema, es el paso previo para lograr la meta del **cero defecto**. Cualquier solución obedecerá a dos posibles grupos de acción: la estrategia de mantenimiento o el rediseño (técnico u operativo).

Paso 5. Establecer condiciones óptimas de funcionamiento

Antes de plantear cualquier hipótesis de solución, el método impone establecer las condiciones óptimas de funcionamiento. Una anormalidad puede quedar en evidencia si se establecen objetiva y explícitamente las condiciones de operación.

Obsérvese que al igual de lo que sucede en RCM es valioso el aporte del personal de producción (Operaciones) para fijar las condiciones (necesarias y deseadas) de funcionamiento. Solamente el trabajo en equipo - entre Mantenimiento y Producción - asegura el éxito de este paso.

Paso 6. Medir cada causa de anormalidad

En función de lo establecido en el paso anterior, debe medirse cada anormalidad (desvío o defecto) contra la situación normal, con el fin de cuantificar claramente las pérdidas. Debe escogerse una unidad de medida y una técnica de medición confiable. En adelante, dicha metodología de medición será la única utilizada para referirse al problema.

Paso 7. Determinar las anormalidades a corregir

Se listan en principio todas las anormalidades medidas en el paso anterior. Luego, se determina cuáles provocan verdaderamente una pérdida y se clasifican como *corregibles*.

Es sumamente importante no omitir ninguna causa que pueda provocar pérdidas; ésta es la única forma de alcanzar la meta **cero defectos**.

Nota: Muchas personas vinculadas a áreas tecnológicas tienen cierta tendencia al rediseño. Sin embargo, un buen *mantenedor* es aquel que prioriza la prevención de los fallos en el sistema actual. El rediseño - técnico u operativo - es la última acción cuando no fue posible encontrar una tarea de prevención más eficaz.

Paso 8. Proponer e implementar acciones de mejora

A diferencia de otras metodologías, los integrantes de un análisis P-M no sólo identifican las anormalidades sino que también buscan eliminarlas. Para esto, el grupo propone e implementa las acciones de mejora surgidas del estudio. Nada impide solicitar asesoramiento externo sobre alguna situación particular que no pueda ser resuelta por los miembros del grupo de trabajo.

Algunas acciones podrán influir en el plan de mantenimiento, incorporando, reemplazando o eliminando tareas. Otras, en cambio, requerirán un rediseño del equipo o una alteración en los procesos de operación o mantenimiento.

Cualquiera sea el caso, el objetivo final de un análisis P-M es controlar los desvíos y evitar la recurrencia perpetuando dichas mejoras en el tiempo.

Paso 9. Replicar la solución

Aún teniendo en cuenta que cualquier diferencia en el contexto operativo puede invalidar toda intención de replicar y aprovechar un hallazgo en otro lugar, siempre es útil la posibilidad de beneficiarse con las mejoras en otras instalaciones que estén padeciendo las mismas o similares anormalidades.

7.3.6.3 Conclusiones

Un Análisis P-M es extremadamente riguroso por lo que no es apropiado aguardar resultados a corto plazo. Téngase en cuenta que con esta técnica podemos erradicar pérdidas marginales; es decir, aquellas fallas o defectos crónicos - de bajo impacto por evento - imposibles de evitar con otros métodos. Siendo que dichas pérdidas, en muchos casos, vienen aceptándose como *normales* hace tiempo, sería injusto pretender eliminarlas rápida y fácilmente.

Así, los responsables de disponer los recursos para examinar un problema por medio de un Análisis P-M, deben comprender que una investigación profunda y metódica insume tiempo y esfuerzo. Un estudio físico intensivo de fallas o defectos de proceso (anormalidades) únicamente es posible paso a paso. Cualquier intento de adelantar etapas se torna perjudicial para el éxito del proyecto. Los pasos deben respetarse uno a uno sin omitir ninguno.

Las pérdidas crónicas marginales sólo pueden eliminarse si se tienen en cuenta las anteriores consideraciones.

7.3.7 Análisis Causa - Raíz de Falla (RCA)

Una técnica muy difundida por su eficacia para resolver problemas complejos, es el análisis RCA (*Root Cause Analysis*). Se trata de un proceso estructurado y deductivo que sirve para identificar las causas primarias (raíces) que desencadenan en una falla funcional, problema o incidente. Es un análisis *pos-morten*, ya que nada puede hacerse para evitar la consecuencia sucedida. Sin embargo, es de gran ayuda para impedir su recurrencia.

Siendo el funcionamiento de los sistemas productivos cada vez más complejo, se impone contar con metodologías efectivas capaces de identificar las relaciones causales que conducen a la falla de los sistemas. Hace tiempo era suficiente con responder a un par de preguntas acerca de cuáles podrían haber sido los orígenes de un evento. Hoy día, sin embargo, es preciso utilizar métodos que garanticen que todas las posibles causas de un evento sean tenidas en cuenta. El análisis RCA brinda la posibilidad de atacar las causas y no concentrarse sólo en los síntomas. Es más tentador concentrarse en los síntomas de la falla que en las causas que la provocan.

El Análisis Causa Raíz es una herramienta estructurada que permite aumentar o mantener la Confiabilidad de los Sistemas Productivos poniendo de manifiesto las causas raíces tanto de fallas crónicas (recurrentes) como de esporádicas. Puede aplicarse junto a otras herramientas de gestión de activos como el RCM. Por ejemplo, durante un análisis RCM el grupo de trabajo determina los modos de falla

capaces de provocar una falla funcional, hayan sucedido o no. Además, se propone la estrategia (tipos y tareas de mantenimiento) que evitaría esos modos de falla o, al menos, mitigaría sus potenciales consecuencias. Sin embargo, pueden aún aparecer fallas funcionales inesperadas cuyas consecuencias no sean toleradas por la organización. Para estos casos, se torna aplicable un *Análisis Causa - Raíz de Falla.*

Es de notar el fuerte potencial de beneficios que surge de vincular RCM con RCA[1].

7.3.7.1 Alcance

El RCA asume que una falla es una desviación con respecto a una situación determinada. Por tal motivo se presenta como una herramienta eficaz no sólo para el área de mantenimiento, sino también para resolver problemas que afectan a sectores de operación, logística, calidad, seguridad, recursos humanos, administración, etc.

Una manera de distinguir las fallas (además de las dos consideradas en el apartado 1.2.2 del Capítulo 1) es separarlas en **esporádicas** y **crónicas** (ver figura 7.3.7). Se dice que una falla es esporádica si provoca un gran perjuicio en forma ocasional. Los efectos y consecuencias son devastadoras, aunque afortunadamente su frecuencia es baja. Una falla esporádica es un problema porque aleja al proceso de la situación normal. Contrariamente, las fallas crónicas ocurren más frecuentemente pero el impacto de cada evento es menor. No obstante, el producto de la frecuencia con que suceden por la pérdida que provocan, podría incluso superar a las pérdidas esporádicas. Las empresas habitualmente aceptan las fallas crónicas como parte natural del proceso; se da una suerte de resignación. Por este motivo, suelen asociarse las fallas crónicas con las oportunidades de mejora.

Se destina más tiempo y recursos a los problemas (fallas esporádicas) porque ejercen más *presión* y son de público conocimiento. Los *héroes* de las organizaciones se preocupan por resolver problemas, mas le temen a las oportunidades. Eliminar fallas crónicas (beneficiarse de las oportunidades) lleva más tiempo y es bastante más complejo de solucionar.

Varios estudios en distintas empresas han demostrado que las pérdidas totales (impacto del evento x frecuencia de ocurrencia) de las fallas crónicas son, en muchos casos, mayores que las pérdidas ocasionadas por los problemas (fallas esporádicas).

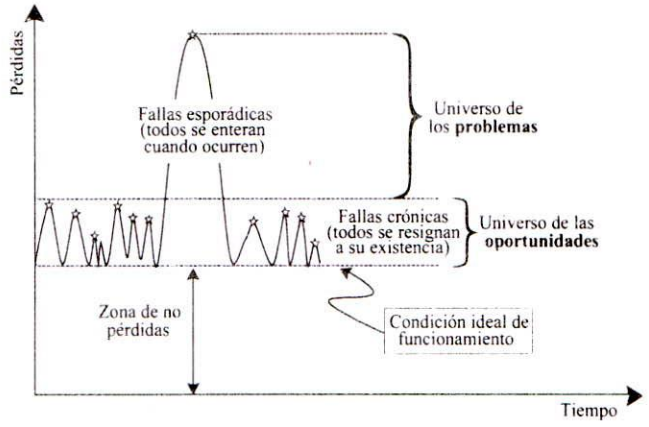


Figura 7.3.7
Fallas crónicas y esporádicas.

Un Análisis Causa Raíz se utiliza, básicamente, para:

- √ Eliminar fallas crónicas que, por su alta frecuencia, producen pérdidas considerables.
- √ Evitar la recurrencia de fallas esporádicas.
- √ Corregir errores humanos durante los procesos de operación, mantenimiento, etc.; sin la búsqueda de responsables (o culpables).
- √ Resolver problemas de cualquier índole que estén afectando a la organización.
- √ Investigar las causas de un accidente (o incidente).
- √ Estudiar los orígenes de una falla funcional luego de aplicar otros métodos de gestión de activos como RCM o TPM.

1 Un análisis RCA sólo se justificará para los modos de falla ocurridos y cuyas consecuencias no fueron admitidas por el análisis RCM. Para aquellos fallos cuyas consecuencias fueron declaradas como "tolerables", no valdría la pena hacer un RCA.

A continuación se describen sucintamente los pasos que propone el RCA. Sin embargo, para aplicar la herramienta profesionalmente y obtener los máximos beneficios es preciso capacitar al personal involucrado en entidades reconocidas[1].

7.3.7.2 Desarrollo

En la primera etapa se identifican aquellos problemas que merezcan ser analizados con RCA. La costumbre es confeccionar un listado con los problemas (o fallas) que están perjudicando a la empresa, luego se los clasifica y cuantifica económicamente. Vale decir, se toma conciencia de los problemas **vigentes**. Para jerarquizarlos, y saber por cuál comenzar, es práctico y sencillo usar Pareto según se vio en la sección 7.3.1.

Escogido el tema a resolver, el facilitador designado para conducir el análisis seleccionará los integrantes del grupo. El personal debe ser idóneo y conocer en profundidad el proceso, sistema, instalación o equipo a estudiar. Todos los sectores de la organización que tengan alguna vinculación con el problema, deberán contar con un representante en el grupo. Cada uno será el embajador ante los demás de su respectiva área, y obtendrá la información de su incumbencia que solicite el grupo. Se ha comprobado que ésta es la mejor manera de validar las hipótesis y responder a las preguntas que se formulan durante el desarrollo del análisis.

El facilitador encomendará reunir toda la información existente relacionada con la situación; lo cual guarda cierta relación con el concepto de contexto operativo (ver RCM). La descripción de la situación actual tiene que ser fundamentalmente objetiva, evitando cualquier presunción, inferencia o suposición. Los **datos** relevados deben ser confiables; el facilitador los clasificará y los transformará en **información** clara, precisa y con valor agregado. Es la etapa investigativa.

El 3° Paso es medular para el proceso. Su objetivo es deducir las verdaderas causas que originan el problema. Con la información reunida por el grupo, y con ayuda de un *Árbol Lógico*, se arma la estructura descendente efecto - causa que conduce a los orígenes de la falla. Siendo que se trata de investigar lo sucedido, no es necesario usar operadores lógicos como en el caso del Análisis por Árbol de Fallas (FTA - *Fault Tree Analysis*[2]).

La parte superior del diagrama (bloque superior) comienza con una muy breve descripción del *problema* o *falla funcional*, ver figura 7.3.8. Esta configuración permite avanzar sobre una línea deductiva múltiple.

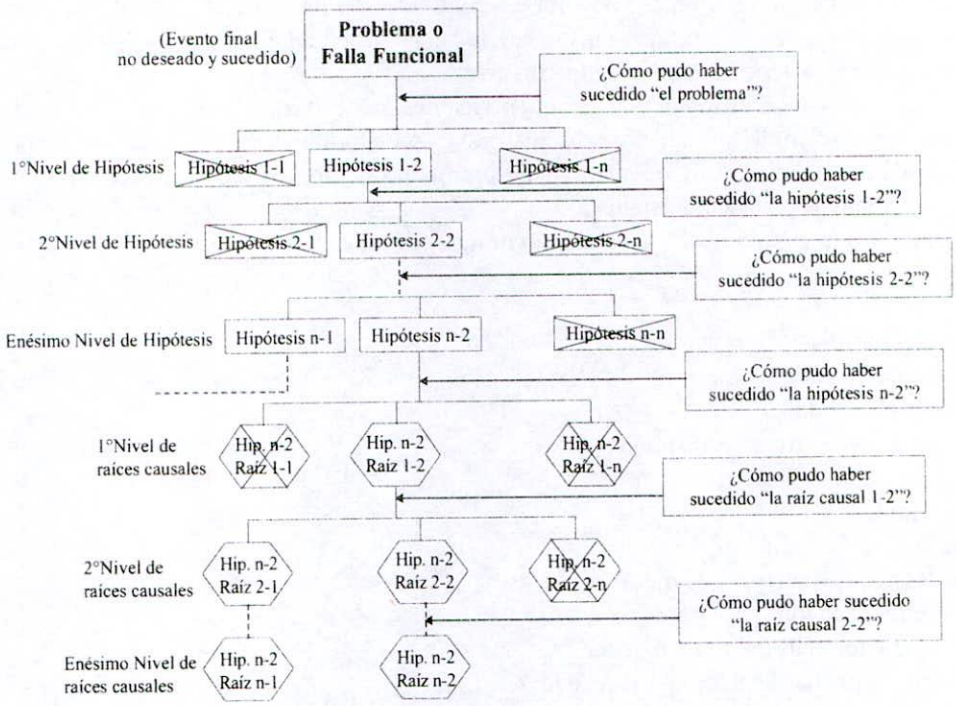


Figura 7.3.8 Estructura modelo de un árbol lógico para RCA.

1 Reliability Center Inc. es una compañía fundada en 1972. Desarrolló una metodología de 5 pasos denominada PROACT® por sus siglas en ingles: PReserving Failure Data, Ordering the Analysis, Analyzing the Data, Communicating Findings and Recommendations, Tracking to Ensure Success.

2 Ver sección 5.2.4.3 Capítulo 5.

Debajo del bloque inicial se vuelcan las hipótesis consideradas como relevantes y causantes del evento superior; siempre con la ayuda de la consigna: **¿Cómo pudo haber sucedido...?** Podrá surgir más de una hipótesis; sin embargo, todas deben validarse a través de evidencias concretas para saber si realmente ocurrieron. Conforme las hipótesis se van descartando, por falta de evidencia clara, se tachan en el diagrama de bloques. La experiencia del personal involucrado, es un arma efectiva para proponer hipótesis; no así para validarlas. El grupo debe ratificarlas por medio de **evidencias concretas**.

Las hipótesis son *causales intermedios*, y pueden existir varios niveles. Debajo, se ubican las causas raíces o de fondo que se deducen haciendo la misma pregunta, sólo que con respecto a la hipótesis inmediata superior. La metodología RCA, desarrollada por la firma Reliability Center Inc., agrupa las posibles causas raíces del siguiente modo:

√ **Raíces Físicas**. Asociadas a componentes. Son todas aquellas causas de origen físico – químico. Los análisis PM (*Physical Mechanism*) identifican raíces físicas.

√ **Raíces Humanas**. Asociadas a intervenciones humanas inadecuadas. Se ubican dentro de este grupo, los errores humanos cometidos tanto durante la operación del sistema, como durante su mantenimiento. Si el análisis corresponde a un proceso administrativo, deben incluirse las negligencias (involuntarias) que pudieron haber motivado el problema.

√ **Raíces Latentes**. Asociadas a deficiencias del sistema organizativo. Generalmente están ligadas a dificultades en la gestión de los procedimientos. Pueden obedecer, también, a falta o caducidad en los controles de calidad.

Las raíces físicas, humanas o latentes, también deben ser validadas. Nunca hay que dar por cierta una causa, sin haberla ratificado fehacientemente. El analista y su grupo de trabajo son los encargados de asegurar que las hipótesis planteadas hayan ocurrido realmente. Dan muy buenos resultados las inspecciones visuales inmediatas (sobre la escena del incidente) y las entrevistas a personas que, de una u otra forma, algo tuvieron que ver con el problema. La empresa debe dar señales claras de que nadie será culpado si se descubre que tuvo alguna relación con la falla o problema investigado. Nadie dará su testimonio si piensa que será sancionado de alguna manera.

Halladas las causas raíces, se proponen las recomendaciones que evitarían la recurrencia. Muchas recomendaciones sólo contemplarán aspectos administrativos o metodológicos. Otras, tal vez, requieran el rediseño de algún sistema o componente dañado prematuramente. Las recomendaciones deben implementarse con la mayor celeridad posible.

A continuación se listan algunas de las causas más comunes de falla. A las raíces físicas se las conoce también como *mecanismos de falla*.

√ Deformación plástica.
√ Deformación inelástica.
√ Fatiga, fricción, pandeo.
√ Concentraciones de esfuerzos o sobrecarga.
√ Corrosión, erosión, abrasión.
√ Fractura, fisuras.
√ Suciedad, contaminación.
√ Solturas, desacoples o errores de mecanizado.
√ Lubricación inadecuada.
√ Montaje, operación o limpieza incorrecta.
√ Uso de materias primas vencidas o inadecuadas.
√ Errores de diseño y fabricación.

√ Falta de procedimientos, de capacitación o de información.
√ Cansancio o desidia frente al trabajo.

Resulta extremadamente útil replicar la experiencia de un análisis RCA en otros sectores de la organización; siempre que las recomendaciones sean aplicables y, además, valgan la pena. Es probable que, aunque la causa raíz identificada no haya generado aún falla en otra instalación, la extrapolación de la recomendación evite otro inconveniente. Téngase en cuenta que no hay que esperar a que sucedan los problemas para actuar contra ellos.

Son las **causas latentes** las que más pueden replicarse en el resto de la organización. Por ejemplo, cuando no existe un procedimiento para la recepción de materias primas y a causa de ello se reciben frecuentemente mercaderías fuera de especificación, es probable que una recomendación para un producto determinado sirva para otros, mejorando así la calidad de todo el proceso de recepción. De la misma forma sucede con aspectos relacionados a la Calidad. Un elemento detectado en estado de falla pudo haber causado serias consecuencias en un equipo; sin embargo, podrán existir más unidades montadas en otros equipos que deberán reemplazarse masivamente.

NOTA: Toda recomendación debe ser analizada por un grupo de expertos; en ningún caso la solución a un problema deberá causar otro de mayor gravedad.

7.3.8 Árbol de Fallos

El estudio de una falla (evento final no deseado) mediante un Árbol de Fallos fue descripto con profundidad en la sección 5.2.4.3 del Capítulo 5. Sólo mencionaremos, entonces, que esta herramienta de diagnóstico e investigación es muy valiosa para determinar la influencia de los distintos *factores causales* y los mecanismos de degradación que contribuyen a generar una falla funcional.

7.3.9 Árbol de Eventos

En sistemas funcionales extremadamente complejos (dotados de varias seguridades) puede resultar necesario desarrollar un Árbol de Eventos para estudiar las consecuencias y su grado de factibilidad cuando se presenta cierto suceso o evento desfavorable.

Es una técnica capaz de cuantificar la probabilidad de ocurrencia de fallas simultáneas - a partir de una o más fallas funcionales, ocultas o evidentes - con alto perjuicio en seguridad. Para sistemas con muchas redundancias y salvaguardas (relacionadas funcionalmente o no) puede ser conveniente "probar en tablero" dichas seguridades antes de poner en servicio la instalación. De la misma forma, cuando es necesario reducir el riesgo industrial de equipos que se encuentran en operación.

Ver sección 5.2.4.4 del Capítulo 5.

7.4 Mantenimiento Productivo Total (TPM)

Existen algunas decenas de libros referidos al TPM (*Total Productive Maintenance*), y algunos por cierto muy destacados[1]. Por tanto, el alcance de esta sección es describir brevemente el método de implementación y destacar ciertas recomendaciones que consideramos útiles para alcanzar el máximo beneficio. Se busca que el lector comprenda los pasos más importantes de cada etapa así como sus fortalezas. Deseamos que sirva de guía para que responsables y artífices del mantenimiento orienten sus esfuerzos en la dirección trazada por el TPM y obtengan los mejores resultados. No obstante, siempre es aconsejable la lectura de bibliografía especializada y el asesoramiento de profesionales idóneos que transmitan sus experiencias.

El TPM se originó, desarrolló y optimizó en Japón inicialmente en la industria automotriz con la finalidad de mejorar los procesos productivos y alcanzar altos niveles de calidad. De igual manera, la experiencia occidental es muy valorada porque el contexto operativo - sobre todo el referido al factor humano - es distinto al de Oriente. Se analizarán algunas particularidades para desplegar TPM en occidente.

Implementar TPM excede ampliamente al área de Mantenimiento; requiere la participación de todos los niveles y sectores de la organización. Se trata de gestionar a la Empresa como un TODO; por lo que es requisito que todas y cada una de las personas piensen y actúen bajo el concepto TPM. La estrategia de Gestión participativa y sistemática que propicia el método, se orienta al logro de resultados y al cumplimiento de metas concretas y mensurables. El sistema "hombre - máquina - empresa" debe funcionar integrado y de forma eficiente y coordinada. Al comienzo de muchas implementaciones TPM, es frecuente escuchar comentarios como: "*...no sabemos a qué darle más prioridad...., si al Mantenimiento o al TPM...*". A lo largo del capítulo el lector comprenderá que ambas cuestiones constituyen la misma cosa.

Es posible y ventajoso desplegar TPM de acuerdo a las necesidades de cada organización. Aunque el modelo original es un tanto rígido, se parte de un error al creer que no pueden hacerse adaptaciones a las condiciones particulares de cada contexto. Justamente muchos fracasos se producen por la falta de flexibilidad que muestran los responsables del proyecto. Una implementación completa y ajustada a las necesidades propias, mejorará la eficiencia y productividad, reducirá el riesgo y la tasa de accidentes, aprovechará al máximo la vida de los activos e incrementará la rentabilidad de los procesos más importantes. La metodología influye sobre dos tipos de actividades en Mantenimiento, según muestra la figura 7.4.1.

Figura 7.4.1 Actividades básicas de un proceso TPM.

7.4.1 Objetivos del TPM

Desgraciadamente se han desarrollado algunas implementaciones alejadas sustancialmente de los objetivos originales del TPM, sobre todo en occidente y particularmente en nuestro país.

El objetivo que persigue el TPM, basado en el modelo original[2], es aumentar la eficacia **integral** de los activos fijos instalados y con ello la competitividad y flexibilidad de la empresa. Algunas compañías interpretan erróneamente este punto y reducen inicial y drásticamente los gastos operativos instantáneos, sobre todo los correspondientes a mano de obra. Comienzan con reestructuraciones devastadoras que no hacen más que socavar la confianza de los empleados (que quedan), obteniendo un resultado opuesto al buscado.

---

1 "TPM in Process Industries" de Takutaro Suzuki y otros autores (Japan Institute of Plant Maintenance), "Introduction to TPM" de Seiichi Nakajima y "TPM for Workshop Leaders" cuyo autor, Kunio Shirose, define al TPM como "un conjunto de actividades para llevar un equipo a sus condiciones óptimas y cambiar el entorno de trabajo para mantener dichas condiciones".

2 El modelo original fue propuesto por el Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM).

El TPM requiere que la persona asuma compromisos diferentes y logre una evolución mental en su forma de afrontar el trabajo. Un cambio cultural profundo en sentido vertical desde las más altas esferas de la empresa hasta el colaborador de menor responsabilidad. Fracasará todo intento de desplegar TPM si la idea parte únicamente desde el área de Mantenimiento. La alta jerarquía de la organización debe comprometerse con el proyecto y transmitir sus intenciones a los niveles inferiores con reglas de juego claras. Si así se hace, se manifestarán oportunidades de mejora naturalmente y se hallarán los métodos para corregir deficiencias.

Uno de los objetivos más importantes es eliminar los defectos (físicos y metodológicos) de tipo crónico para alcanzar estándares de calidad y eficiencia supremos. Ciertas aplicaciones han logrado altos niveles de disponibilidad con excelentes índices de seguridad (baja tasa de accidentes) y, al mismo tiempo, productos de gran calidad. Un objetivo indirecto o alternativo, es cambiar el comportamiento y la *"cultura"* de los empleados, así como el de la empresa en su conjunto.

La **visión** del TPM puede resumirse en los siguientes cuatro puntos.

√ Cero tasa de accidentes (*e incidentes*).

√ Cero tasa de defectos (*"fabricar calidad"*).

√ Cero tasa de averías (*fallas y desviaciones*).

√ Vale decir, cero pérdidas de cualquier índole[1].

Para alcanzar los puntos anteriores debe suceder que:

√ Los colaboradores logren capacidades y habilidades diferentes. El cambio de conducta se basa en una profunda convicción.

√ La empresa flexibilice sus procesos, destine recursos suficientes y propicie un marco de contención para sus trabajadores.

√ Se practique la *gestión del conocimiento*, para ubicarlo al alcance de cualquier empleado interesado.

√ Los integrantes del sector Mantenimiento estén predispuestos al cambio, y posean un espíritu crítico frente a los problemas.

√ El sistema de mantenimiento implementado detecte prematuramente fallas o desvíos.

√ Exista la cultura del *trabajo en equipo* – cada colaborador aporte lo mejor de sí –; los resultados son globales, compartidos y no individuales. Todos los empleados participan de una u otra manera en grupos pequeños, comprometidos y autogestionados.

√ Las acciones de todas las áreas estén alineadas para satisfacer los mismos objetivos; aumentar la Productividad Total Efectiva de los Equipos.

√ El Mantenimiento se practique desde la idea misma de instalar un equipo y lo acompañe hasta el fin de su vida.

---

1 Ver sección 7.4.7 "Pérdidas y Productividad Total de Equipo".

7.4.2 Beneficios esperados de su aplicación

Ya mencionamos algunos beneficios directos o indirectos en los párrafos anteriores. Veamos un resumen en el siguiente cuadro.

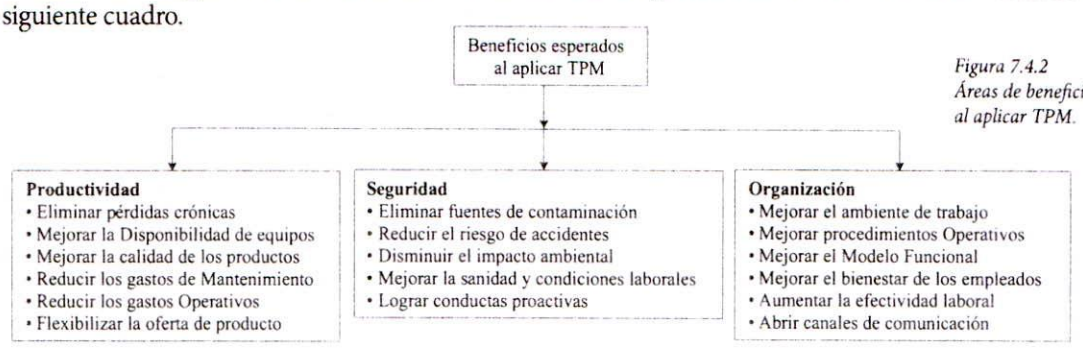


Figura 7.4.2
Áreas de beneficios al aplicar TPM.

7.4.3 Proceso de Implementación

Para llevar adelante una implementación TPM, la compañía debe cumplir las siguientes etapas.

- √ **Tomar la decisión de aplicar TPM, crear un Comité Directivo y anunciar la decisión.**
- √ **Capacitar al Comité Directivo y hacer una fuerte campaña de difusión.**
- √ **Crear la estructura necesaria para promover el TPM y educar a los involucrados.**
- √ **Definir las políticas internas y establecer metas y objetivos.**
- √ **Desarrollar y aprobar, por la alta gerencia, un Plan Maestro (Master Plan).**
- √ **Lanzar el Proyecto TPM (Kick-off) con un Plan Piloto.**
- √ **Implementar los Pilares TPM en la secuencia fijada por el Master Plan.**

No obstante, es aconsejable realizar previamente un estudio de factibilidad que responda, por lo menos, a las siguientes cuatro preguntas.

- √ ¿Se encuentra la Planta preparada para un proceso de estas características?
- √ ¿Es conocido el nivel de capacitación y entrenamiento requerido para los integrantes?
- √ ¿Se ha determinado en qué sectores de la Planta (o Proceso) es conveniente comenzar?
- √ ¿Se ha cuantificado el costo total de la inversión así como los beneficios esperados?

7.4.3.1 Organización necesaria para implementar TPM

La figura 7.4.3 pretende mostrar la estructura de conducción para desplegar un modelo de Gestión TPM. Todos los grupos, incluso el de Liderazgo Gerencial, están formados por una pequeña cantidad de personas altamente comprometidas con el proceso.

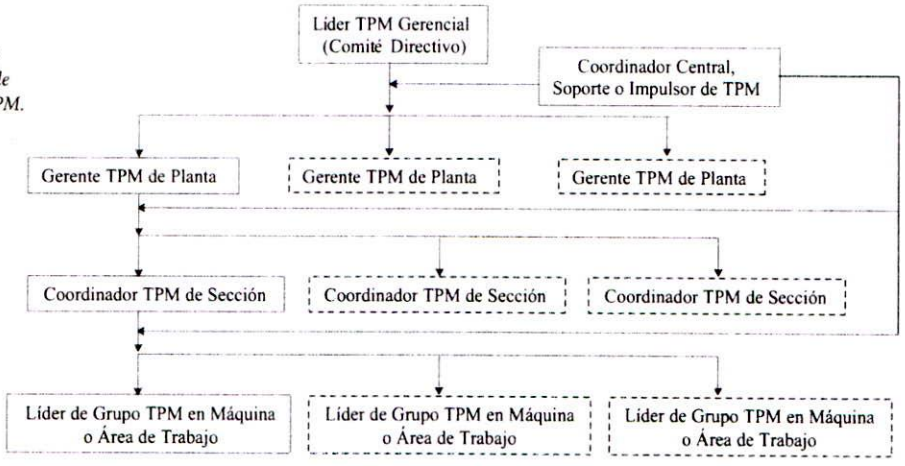


Figura 7.4.3
Estructura de liderazgo TPM.

El rol del Coordinador Central TPM (también llamado Paladín del TPM) es crucial para el éxito del proyecto. Su grupo de trabajo debe apoyar a todos los sectores de la empresa a través de capacitación y campañas de difusión. Es el responsable de impulsar vertical y horizontalmente el Plan Maestro aprobado por el Líder Gerencial.

7.4.3.2 Implementación del TPM fuera de Japón

Las dificultades más importantes encontradas al tratar de implementar TPM fuera de Japón, son las mostradas en la figura 7.4.4. Los líderes gerenciales deben esforzarse para eliminar estas diferencias o reducir sus consecuencias.

En Japón	Fuera de Japón
•Compromiso corporativo con el TPM	•Menor compromiso corporativo y gerencial.
•Actitud proactiva de los empleados.	•Resistencia individual a los cambios.
•Planificación a muy largo plazo.	•Menor presión sobre resultados en toda la organización.
•Capacidad de realizar más de un paso al mismo tiempo (ej. Mejora Enfocada y Mantenimiento Autónomo).	•Restricciones de gastos y escasez de recursos.
•Flexibilidad de tiempo para reuniones de trabajo o entrenamiento.	•Falta de concentración y esmero en las tareas.
•Mayor presión sobre resultados.	•Falta de disciplina.
•Tiempo adicional y voluntario de trabajo.	•Restricciones de tiempo (dispersión en otras actividades)
	•Rechazo a la sobrecarga de entrenamiento y reuniones.
	•Falta de compromiso y participación de los convenios de trabajo vigentes.

Figura 7.4.4
Dificultades comparativas para implementar TPM fuera de Japón.

Los responsables del proyecto tienen que encontrar el equilibrio funcional y ser pragmáticos para salvar las diferencias sin alejarse sustancialmente de las reglas del método. El único éxito importante es aquel que alcance la compañía; nunca anteponer el éxito de la metodología por sobre el de la empresa.

Los controles de eficacia y eficiencia deben orientarse a monitorear los beneficios alcanzados. El planteo de indicadores tanto de resultados como metodológicos, aumenta las posibilidades de lograr las metas establecidas. Si bien los indicadores de progreso deben ser desafiantes, también deben ser alcanzables y medibles con objetividad.

El Plan Maestro aprobado por la Dirección establecerá la secuencia y profundidad de cada Pilar TPM, así como el alcance en *horizontal*; es decir, a qué unidades funcionales alcanzará.

7.4.4 Pilares TPM

Un sistema de Gestión Industrial que pretenda aplicar la metodología TPM, requiere conducir los esfuerzos con procesos que articulen los distintos campos de la herramienta. El TPM los llama **Pilares** y son 8 estos canales conductores que vinculan el accionar de los sectores funcionales de la compañía. Las tareas más importantes de cada área se optimizan a través de estos pilares.

A su vez, cada Pilar se divide en **Pasos**, cuyo despliegue será gradual y sistemático. Dichos pasos o etapas se auditan con el fin de medir el estado de situación y evaluar la posibilidad de avanzar al siguiente. La disciplina del grupo es primordial para el éxito.

Los 8 Pilares sobre los que se apoya el TPM se los reconoce como:

√ **Mantenimiento Autónomo (Jishu Hozen)**
√ **Mantenimiento Planeado (Keikaku Hozen)**
√ **Mejora Enfocada (Kobetsu Kaisen)**
√ **Gestión Temprana o Inicial**
√ **Mantenimiento para la Calidad (Hinshitsu Hozen)**
√ **Capacitación y Desarrollo**
√ **Gestión de los Sectores Administrativos (Áreas Indirectas)**
√ **Higiene, Seguridad y Medio Ambiente**

Siendo estos 8 Pilares el corazón del TPM, veamos algo más en detalle cada uno.

7.4.4.1 Pilar - Mantenimiento Autónomo (Jishu Hozen)

El Mantenimiento Autónomo (MA), también conocido en occidente como *mantenimiento de uso*, pretende alcanzar en su máximo estado de desarrollo evolutivo la autogestión plena de los operadores, asumiendo éstos responsabilidades sobre las máquinas que no requieran la intervención de otros sectores, salvo para tareas específicas. Esto aumenta la disponibilidad del equipo, reduce las pérdidas productivas y mejora la seguridad del entorno.

El área de mantenimiento transfiere, inicialmente, tareas llamadas de *primera línea* (first line) como limpieza, lubricación, purga, ajustes menores y hasta cambio de piezas. Conforme progresan las competencias y habilidades de los operadores, van asumiendo otras rutinas de mayor complejidad hasta alcanzar gran protagonismo en la gestión total del sistema. Tal situación no le resta prestigio ni participación al área de mantenimiento, más bien se la incrementa, pues los operadores asumen la ejecución de las rutinas pero no la responsabilidad total por los resultados. La eficacia, eficiencia y efectividad del trabajo autónomo sigue siendo responsabilidad del área de mantenimiento y sus líderes.

Los especialistas de mantenimiento capacitan a los operarios de producción transfiriéndoles progresivamente destrezas y habilidades. Esto descomprime al plantel de mantenimiento para que pueda dedicarse a trabajos de mayor envergadura como el análisis de fallas crónicas y complejas. Mantenimiento se reserva el derecho - en todo momento - de auditar la ejecución de las tareas controlando la calidad y el tiempo de realización.

El Mantenimiento Autónomo evita, de este modo, gran cantidad de averías producidas por falta de limpieza, lubricación deficiente, falta de ajuste o fugas. Además, si el grupo TPM destinado a la máquina alcanza alto nivel de habilidad, puede incluso realizar tareas de carácter reactivo reponiendo la funcionalidad de la máquina detenida (Mantenimiento Correctivo). Una ventaja adicional del MA es que los operadores se transforman en "*diagnosticadores*" por excelencia dada su cercanía a las instalaciones. Se reduce el tiempo de las reparaciones (T_{TC}) y aumenta la disponibilidad del activo.

Por su carácter polivalente, el personal autónomo también podrá proponer mejoras (rediseños menores) que mejoren la Confiabilidad y Mantenibilidad. Así mismo, se espera que mantengan su área de trabajo libre de elementos extraños y fuentes de contaminación (Ver Anexo XI "*Estrategia de las 5S*"). El conocimiento técnico y las habilidades adquiridas, les permiten identificar situaciones de peligro disminuyendo el riesgo de accidente.

Los despliegues de MA buscan que los miembros del equipo (ME) incorporen el concepto *"a mi equipo lo cuido yo"*. Por ejemplo, la falta de limpieza es una de las causas que produce mayor cantidad de averías e inconvenientes de calidad; esta metodología intenta eliminarlos. El propio grupo TPM, con la colaboración de Ingeniería y Mantenimiento, es quien define las **Rutinas de Inspección**[1], **Instructivos de Trabajo** y **OPL's**[2] que luego usará para desarrollar el *First Line Maintenance (FLM)*.

El control visual rutinario o *Inspección Operativa Autónoma* (IOA) se realiza con ayuda de estos estándares o rutinas de inspección que pueden ser dinámicos o estáticos, dependiendo si el chequeo se hace con máquina detenida o en funcionamiento. Dichos estándares deben incluir la limpieza frecuente del equipo.

---

1 Ver sección 2.3.1 "Rutinas de Inspección", Capítulo 2.
2 OPL: One Point Lesson (Lección de un Punto), ver Anexo VIII.

(IOA) Rutina de Inspección Operativa Autónoma - Dinámica				
Área:	Servicios	Fecha Última Revisión: 10/01/2006	Fecha:	15/03/2006
Sector:	Filtración		Responsable:	Mantenimiento Autónomo
Equipo / Línea:	Filtro Prensa		Tiempo estimado:	40'
Estándar:	Rutina de Inspección Dinámica (RID)		*Fotografía del Equipo / Línea o alguna referencia válida que ayude a realizar la Tarea.*	
Frecuencia:	Semanal			
Realizó:	Julián Alvarez			
Protección Personal y Precaución:	Particulas dispersas: (Protector Ocular) Riesgo eléctrico: (Cables, equipo con tensión) Sistemas en Movimiento: (Precaución) Zapatos de Seguridad y EPP.	Autorizo: Firma Ejecutante:		

Equipo	Descripción de la Tarea	Modo	Valor esperado	Acción	Tiempo	Registro/Observaciones
Filtro Prensa N° 1	Realizar la limpieza del equipo.	Manual	Limpio	--	15'	
	Verificar si la bomba hidráulica funciona sin ruidos ni vibraciones.	Visual	Sin ruidos extraños ni vibraciones	Aviso	2'	
	Verificar si las indicaciones de las presiones hidráulicas se encuentran dentro de los valores normales.	Visual	Normal	Registro	2'	
	Verificar turbiedad del fluido hidráulico.	Visual	No turbio	Aviso	3'	
	Verificar el nivel de espuma del fluido hidráulico en el depósito.	Visual	Espuma dispersa	Aviso	3'	
	Controlar el nivel del fluido hidráulico.	Visual	Superior al mínimo	Registro	2'	
	Verificar existencia de pérdidas de fluido hidráulico.	Visual	Sin pérdidas	Aviso	5'	
	Registrar temperatura del fluido hidráulico.	Visual	Inferior a 50 °C	Registro	2'	
	Verificar estado de limpieza de las entradas de aire y de los filtros.	Visual	Limpio	Aviso	3'	
	Verificar el estado general y limpieza del equipo completo.	Visual	Limpio	--	3'	
	Dar aviso de cualquier anormalidad en el equipo y sus indicaciones, durante el chequeo de los puntos anteriores.	Visual	Sin anomalías	Aviso	--	
					40'	Tiempo Real:

Figura 7.4.5 Ejemplo de estándar de Inspección Operativa Autónoma (IOA).

Las OPL's (*One Point Lesson*) son documentos ilustrativos y pedagógicos que instruyen a los ME en la forma correcta de efectuar un trabajo; Mantenimiento es responsable por mantenerlos actualizados y vigentes. Aquí, los especialistas de mantenimiento juegan un rol protagónico para el éxito del Pilar Autónomo. Su función es brindar asistencia técnica en todos los pasos del despliegue MA.

Otra herramienta de mucha utilidad para el Pilar Autónomo son las **Tarjetas** de colores. Los operadores gestionan el mantenimiento y registran las anormalidades del equipo a través de estas tarjetas. Las tarjetas son el output de las IOA's y se vuelcan en ellas los defectos detectados. Según sea el tipo de anomalía se usa un color de tarjeta y, según sea el grado de habilidad de los operadores, las resuelven ellos o las transfieren a los especialistas.

Resulta oportuno mencionar que una tentación en la que caen algunas organizaciones, es transferir talentos técnicos desde las áreas de Mantenimiento a las áreas Operativas. Se cree erróneamente que así se reduce el tiempo de implementación del Pilar Autónomo dado que el personal transferido está suficientemente capacitado en labores de mantenimiento.

Lamentablemente esto trae dos inconvenientes a la vista. El primero es que el personal de mantenimiento es trasladado a áreas de trabajo que no son de su interés y tal vez no lo sean nunca, restándole motivación. La segunda, y tal vez la más importante, es que las funciones vitales de mantenimiento (especialidades) quedan desiertas porque el personal más valioso se pierde en tareas operativas. *Formar un técnico altamente especializado demora años.*

Gestión Visual

Practicar la **Gestión Visual** es un arma valiosa en el MA. Consiste en colocar sobre la máquina placas o marcas que identifiquen los lugares estratégicos como puntos de lubricación. Se utiliza una convención de colores o números que vinculan unívocamente un punto de lubricación con el tipo de lubricante, disminuyendo el riesgo de lubricar puntos con productos no apropiados. También puede identificarse el sentido de giro en motores, el desplazamiento máximo de mecanismos, el sentido del flujo en cañerías, etc.

El Pilar Autónomo se implementa gradualmente en una secuencia de Pasos claramente concebidos. Hay que delimitar hasta donde pueden y deben actuar los ME en cada Paso, para mantener el estado de Condición Básica[1] de la máquina.

Si bien es conveniente comenzar los despliegues de MA en aquellas unidades funcionales con mayor potencial de beneficio, hay situaciones en las que se prefiere lanzar el Plan Piloto en lugares cuyos ME estén más predispuestos o posean el mayor potencial de trabajo. Lo más importante en un proyecto de estas características es que la primera experiencia salga bien.

Pasos del Pilar Autónomo

El primer paso es una limpieza inicial y profunda del equipo que deberá sostenerse en el tiempo. La limpieza cobra, en tal sentido, el valor supremo de *inspección*. Cuando limpia, el operario identifica solturas, situaciones peligrosas, fuentes de contaminación, fugas, falta de lubricante, obstrucciones, etc. El Paso 6 del Pilar, por su parte, puede requerir la capacitación de los ME en aspectos netamente técnicos. Los Pasos restantes se resumen en la tabla 7.4.1.

PILAR: MANTENIMIENTO AUTÓNOMO		
PASO 1	Limpieza Inicial	- Eliminación profunda de tierra, grasa, suciedad, etc. y de elementos obsoletos o innecesarios. - Tomar conciencia y garantizar la Seguridad de las personas y del entorno. Elaborar un Mapa de Seguridad del Equipo y un Análisis de Riesgo en la zona Operativa. - Identificar y Restaurar el deterioro de la máquina por medio de: · Tarjetas de anomalías o defectos. · Inspecciones Estáticas / Dinámicas (Provisorias). · Lista de problemas y OPL's. · Lista de las fuentes de contaminación. · Lista de los lugares de difícil acceso.
PASO 2	Eliminar fuentes de contaminación y lugares de difícil acceso	- Eliminar las condiciones que causan el deterioro acelerado o el riesgo, identificadas en el Paso 1. - Optimizar los procesos de limpieza, lubricación y ajuste. - Eliminar fuentes de contaminación y lugares inaccesibles.
PASO 3	Establecer Estándares de Limpieza / Inspección	- Mantener la Condición Básica por medio de: · Estándares de limpieza, lubricación y ajuste. · Estándares de calidad. · IOA's Estáticas / Dinámicas (Definitivas). · Uso intensivo de controles visuales (Gestión Visual).
PASO 4	Realizar inspecciones generales de máquina	- Desarrollar operadores competentes en la operación y en el mantenimiento de la máquina (evitar errores humanos). - Extender el uso de los controles visuales.
PASO 5	Realizar inspecciones generales de proceso	- Desarrollar operadores competentes que comprendan el proceso. - Extender el uso de IOA's a las fronteras del equipo.
PASO 6	Sistematizar el Mantenimiento Autónomo	- Introducir normas de calidad y seguridad en la gestión del activo (vinculación con los Pilares de Calidad y Seguridad). - Mejorar la eficiencia de las IOA's. - Crear un sistema para detectar y corregir defectos de calidad.
PASO 7	Practicar la autogestión plena	- Reducir el costo de Mantenimiento y Operación del equipo. - Consolidar las actividades de mejora alcanzadas en los Pasos anteriores. Medir parámetros de Confiabilidad y Mantenibilidad.

Tabla 7.4.1
Resumen de los 7 Pasos del Pilar Mantenimiento Autónomo (MA).

*1 Por **Condición Básica** se entiende aquel estado de limpieza, lubricación y ajuste adecuado que evita el deterioro acelerado del equipo. Son las condiciones mínimas definidas para mantener la máquina funcionando.*

Nota: Si bien la eliminación de riesgos esta implícitamente considerada en todos los Pasos del Pilar Autónomo, en la tabla anterior se incluye explícitamente dentro de los Pasos 1 y 2.

Auditorias de Paso en el MA

La metodología impone efectuar Auditorias de Paso para ratificar la evolución de los ME y verificar si están en condiciones de pasar al siguiente[1]. Las auditorias son estrictas y de cumplimiento obligatorio. A continuación se muestra un ejemplo del formato usado para una Auditoria de Paso 1.

Nombre de la Empresa	Auditorias de Paso Pilar Autónomo	Código	MA-P1
		Revisión	1
		Fecha	25/8/2004
		Página	1 de 1

	MANTENIMIENTO AUTÓNOMO	REFERENCIAS	
	Auditoria de Paso 1: Limpieza Inicial	Aprobado	≥ 80%
Planta/Sector:	Fecha: Máquina:	Auditor/es:	

ASPECTOS AUDITADOS	#	DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS AUDITADOS	Malo --- Muy Bueno 0 1 2 3 4	Obs.
Generalidades	1	¿Qué es TPM?, ¿pueden los miembros de equipo (ME) definir el Mantenimiento Autónomo (MA)?		
	2	¿Se conocen los objetivos del Pilar MA, sus herramientas y la finalidad del Paso 1?		
	3	Los ME, ¿pueden explicar los conceptos de limpieza e inspección?		
	4	La matriz de habilidades, ¿refleja lo que deben saber y lo que han aprendido?		
OPL´s	5	Los ME, ¿saben qué son las OPL's?, ¿conocen su objetivo y para qué se utilizan?		
	6	¿Existe una forma de monitorear que los ME realizan OPL's?, ¿se utiliza?		
	7	¿Existe evidencia de entrenamiento y registro para las OPL's (herramienta, contenido técnico, etc.)?		
Estado de la máquina	8	¿Se ha removido toda suciedad, polvo, residuos, manchas de lubricantes, etc. acumulados?, ¿se han identificado y corregido los defectos, principalmente los vinculados con la seguridad?		
	9	¿El equipo está bien lubricado, ajustado y sin vibraciones?, ¿su entorno está limpio y organizado?		
	10	¿Existe evidencia objetiva de que la limpieza de entorno responde a un plan y estándar definido?		
Detección de anomalías	11	¿Está asegurada la Condición Básica a través del estándar de inspección (IOA)?, ¿hay OPL's que la especifiquen?, ¿existe un circuito de gestión de Tarjetas?		
	12	Los ME, ¿pueden definir qué es un lugar de difícil acceso?, ¿pueden identificar alguno?		
	13	Los ME, ¿pueden definir qué es una fuente de contaminación?, ¿pueden identificar alguna?		
Mantenimiento de Condición Básica	14	¿Existe evidencia documentada que el estándar provisorio se cumple de acuerdo a las frecuencias establecidas?, ¿fueron definidos los tiempos para cada tarea y se registran?		
	15	Los dispositivos de seguridad, tanto para las personas como para el equipo, ¿están incluidos como puntos de inspección?, ¿se hizo un estudio de las frecuencias utilizadas?		
	16	¿Existen y están compartidas las OPL's asociados a cada grupo de componentes?		
Operador / Dueño del Equipo	17	Los ME, ¿conocen las fallas de su máquina (tipo, cantidad, estado)?, ¿tienen ADF's?, ¿cuál es el estado de avance de los mismos?, ¿participan los ME de la ejecución y análisis de fallas?		
	18	Los ME, ¿conocen el Pareto de los pequeños paros?, ¿tienen evidencia objetiva de la planificación para su eliminación o control?, ¿se encuentra completo el sistema de registro de las fallas?		
Cuadro de Actividades	19	Las responsabilidades diarias relacionadas con el despliegue, ¿están definidas?, ¿están claras para los ME e incluidas en la información del cuadro de actividades?		
	20	A través del cuadro de actividades, ¿quedan claras las metas y las tareas del equipo autónomo?		
	21	El cuadro de actividades, ¿se encuentra ordenado y posee los elementos necesarios para ello?		
Resultados	22	¿Existe evidencia de mejora en los resultados de eficiencia, confiabilidad, disponibilidad, índices particulares de la máquina?		
	23	¿Existe evidencia de reducción en la cantidad y duración de las fallas de la máquina?		
	24	¿Existe evidencia del seguimiento de estos resultados y de una mejora de los mismos?		
Participación	25	Las responsabilidades diarias del despliegue, ¿se están ejecutando y se encuentran balanceadas entre los ME?, ¿se realizan análisis Por qué - Por qué?, ¿se identifican y resuelven las tarjetas por todos los ME?, ¿se efectúan reuniones, minutas, cuadros de novedad, etc.?		

Observaciones:	TOTAL:	PUNTOS 0	
	Firmas del Equipo Auditor	Aprobado:	Desaprobado:

Figura 7.4.6
Formato característico para Auditorias de Paso 1 (Pilar Autónomo).

1 Cada organización debe establecer el puntaje mínimo a partir del cual el Grupo se encuentra en condiciones de aprobar el Paso. Lo mismo deberá suceder para las Auditorias de los demás Pilares.

Consideraciones Especiales

Se destacan a continuación algunos puntos que merecen una consideración especial.

√ **Focalizar en los modos de falla**. Implica orientar los esfuerzos para evitar, desde el comienzo, las verdaderas causas raíces de falla. Se obtienen los mayores beneficios si los estándares, aún **provisorios**, atacan los modos de falla con verdadera consecuencia sobre el funcionamiento del activo. La mayoría de las anomalías son causadas por pocos modos de falla que pueden prevenirse con MA. El staff de especialistas de Mantenimiento velará por la correcta aplicación y profundidad del MA y dejará para sí la ejecución de rutinas que prevengan modos de falla complejos.

√ **Consolidar Etapas**. Pasar a una etapa superior sólo si las capacidades adquiridas por los ME han sido consolidadas. Es más conveniente hacer bien pocas tareas que muchas de baja calidad técnica. El personal autónomo debe *ver* anomalías, defectos o síntomas de fallas y no *mirar* únicamente una secuencia ordenada de puntos de inspección. Un gran volumen de tareas en una IOA no aporta muchos beneficios, suele caerse en el acostumbramiento y en el conocido *tildado pre-ejecución*.

√ **Límite de transferencia**. ¿Cuál es límite de transferencia de tareas de mantenimiento que admiten los ME? Esta pregunta tiene respuestas más que discutidas. En primer lugar depende del tipo de industria, su escala y proceso productivo. También depende de la capacidad técnica y de la actitud de los ME, así como de las condiciones geopolíticas y gremiales. Lo cierto es que un grupo TPM de Mantenimiento Autónomo no puede atender satisfactoriamente una cantidad ilimitada de equipos. Los coordinadores deben evaluar la calidad técnica alcanzada en cada Paso y evaluar en qué momento ese grado de calidad se ve afectado conforme aumentan los equipos incluidos en las labores del grupo.

√ **Incremento de los gastos**. Inicialmente, y sobre todo en los tres primeros pasos del Pilar, puede verse incrementado el gasto instantáneo de mantenimiento; no así el gasto integral que debería bajar dada la mayor cantidad de fallas evitadas y el aumento en disponibilidad. Por tal motivo, hay que atacar las verdaderas causas raíces de falla y no las superfluas.

√ **Tareas a "discreción"**. Evitar la confección de estándares con escaso criterio técnico; la abundancia de tareas los convierte en tediosos, peligrosos y antieconómicos. En ocasión, se excede el tiempo disponible de trabajo. Se requiere de astucia para ajustar a una jornada de trabajo todas las labores de mantenimiento y producción que tendrá el grupo. Los estándares iniciales o provisorios suelen surgir de un brainstorming en los que los ME vuelcan sus ocurrencias sin demasiado análisis; esto conduce a estándares irrealizables y sin consistencia técnica. Recién en el Paso 5 es común esperar reducciones de hasta un 60% en las tareas; sin embargo, hasta allí se ha invertido mucho tiempo y dinero[1].

√ **Reuniones con los ME**. Una dificultad que se presenta, son las reuniones entre integrantes del grupo y cuyo objetivo es coordinar esfuerzos y acciones. En ocasiones, la organización debe considerar el pago de horas extras para reunir a los ME como indica la metodología.

√ **Reducción de los tiempos para cambio de Producto**. El MA, a través de la creación, implementación y mejora de **estándares específicos** para cambio de "producto", puede reducir considerablemente los tiempos de parada. Esto mejora la disponibilidad operativa en líneas productivas donde son necesarias frecuentes detenciones para cambiar los *calibres, moldes, configuraciones o matrices*. Dichas mejoras, junto con la planificación precisa de los cambios de turno, agregan gran valor a la gestión del MA reduciendo los tiempos *muertos*.

---

1 Si bien para el TPM ninguna opinión debe desestimarse en beneficio del autoaprendizaje, lo cierto es que tampoco podemos esperar que el personal "reinvente la rueda" en cada accionar.

7.4.4.2 Pilar - Mantenimiento Planeado (Keikaku Hozen)

Implementar correctamente el Pilar Mantenimiento Planeado (MP) encierra grandes beneficios. El propósito fundamental es el "cero averías" y reducir gastos operativos y de mantenimiento a través de la **Gestión** de los activos bajo despliegue.

En las industrias de proceso tiene mucha importancia el Pilar MP porque poseen equipos de gran consumo energético y la falta de eficiencia les provoca serias pérdidas económicas. Además de maximizar el rendimiento, el Pilar MP aumenta la disponibilidad de todo el sistema. Cuando un equipo falla y sus tiempos medios de reparación (MTTR) son grandes, las Paradas Planificadas para reestablecer el funcionamiento suelen ser muy extensas por la complejidad técnica de la intervención. Con una planificación rigurosa, el MP puede reducir drásticamente el tiempo de ejecución, el consumo de repuestos y materiales, y el riesgo de accidentes.

Durante un despliegue de MP, el departamento de mantenimiento se ocupa de los **Rediseños**[1] **Menores** y de mejorar la **Gestión Administrativa** de los procesos internos. A su vez, sugiere un tratamiento especial para las acciones reactivas *(Mantenimiento de Averías según el criterio TPM)* y focaliza esfuerzos en el control y reducción de gastos. Tanto el Mantenimiento Preventivo Periódico (MPP) como el Mantenimiento Predictivo (Basado en Condición), juegan un papel protagónico. Justamente un paso que impone el método es desarrollar o mejorar el sistema de *Mantenimiento Basado en Condición*.

El TPM propone estabilizar el MTBF (con limpieza, lubricación y ajustes regulares) para poder establecer intervalos seguros de mantenimiento preventivo y predictivo. En la práctica, y como fuera enunciado en el Capítulo 2, esto es aún válido para los casos en que la dispersión de las fallas es baja. Además de estabilizar el MTBF, es preciso que tenga baja dispersión, lo cual se logra eliminando o "limpiando" algunos modos de falla con un buen nivel de **Condición Básica**. Al respecto, el TPM sugiere alcanzar un MTBF *previsible*.

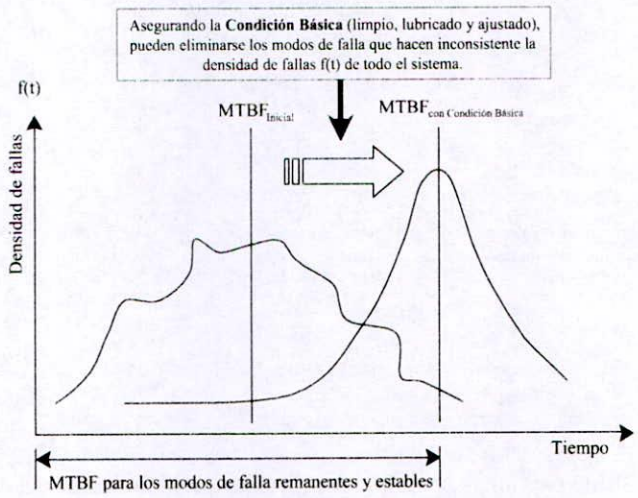


Figura 7.4.7
Estabilización del MTBF asegurando la ***Condición Básica***.

No obstante, cabe una aclaración importante. Una cosa es el MTBF de un componente (con uno o pocos modos de falla), y otra muy distinta el MTBF de todo un sistema.

---

1 Téngase en cuenta que la metodología TPM define a los Rediseños y Mejoras como "Mantenimiento Correctivo" y reserva el término "Mantenimiento de Averías" para los fallos imprevistos que no encierran gran perjuicio para la seguridad o la producción. Para evitar confusiones se continuará con la designación utilizada en los capítulos previos.

Un equipo complejo (sistema) que puede fallar a causa de varios modos de falla tendrá, de por sí, un MTBF de alta dispersión. Esto se debe a que el MTBF del conjunto ($MTBF_{Sistema}$) es la resultante del accionar simultáneo de cada uno de los $MTBF_i$. El desafío del MP es equilibrar, con rediseños y mejoras *(Mantenimiento Mejorativo)*, los componentes cuyas resistencias naturales al desgaste sean demasiado heterogéneas. Si la resistencia natural al desgaste de la mayoría de los componentes es similar (y todos responden a la curva de la bañera), entonces el $MTBF_{Sistema}$ tendrá baja dispersión.

Por otra parte, siendo que muchos modos de falla pueden prevenirse asegurando la **Condición Básica**, quedarían sólo aquellos modos de falla dominantes causados por desgaste natural. Los efectos de estos modos de falla remanentes y estabilizados, podrían evitarse con un Plan de Rutinas Preventivas, siempre que se justifiquen económicamente.

Si bien el MA, y otras mejoras impulsadas por el Pilar MP, pueden reducir la inconsistencia del $MTBF_{Sistema}$, todavía podrán existir modos de falla que no obedezcan rigurosamente al patrón de fallas de la bañera. Si, además, éstos encierran un perjuicio para la seguridad o el entorno, más vale desechar la idea de aplicar únicamente rutinas basadas en el $MTBF_{Sistema}$ pues aún así podrían sufrirse consecuencias catastróficas.

No siempre la avería imprevista es causada por un Mantenimiento Preventivo incorrecto. Si aún con alta calidad en mantenimiento preventivo, y con apoyo fuerte del Pilar Autónomo, siguen apareciendo fallas aleatorias, tal vez la solución se encuentre en otra estrategia.

Un despliegue de MP debe diseñar estándares especializados de inspección, control, recambio y reparación. Cada intervención debe contar con un Instructivo de Trabajo (IT) que detalle las tareas y el tiempo de ejecución estimado. No es suficiente con emitir una Orden de Trabajo (OT), la misma deberá contar con un IT que indique la clase de tarea (restauración, recambio, limpieza, etc.), código del repuesto, herramental necesario, elementos de protección personal (EPP), parámetros de calidad, y cualquier otra observación útil para mejorar la eficiencia y seguridad del trabajo.

Establecidos los IT preliminares, el Pilar MP impone su revisión permanente para mejorar la eficiencia de las rutinas al máximo; lo que es responsabilidad del sector Mantenimiento.

Figura 7.4.8
Actividades principales del Pilar ***Mantenimiento Planeado*** *(MP).*

La figura anterior resume tres áreas principales sobre las que debe actuar el departamento de mantenimiento al desarrollar un despliegue de MP.

√ Implementar rutinas de inspección (para MA y MP) tendientes a estabilizar el MTBF y a erradicar el deterioro acumulado; vale decir, asegurar la Condición Básica eliminando las fallas crónicas.

√ Adoptar medidas para mejorar las condiciones de operación y mantenimiento eliminando errores de operación o aumentando la mantenibilidad. Incluye mejorar materiales y repuestos, cambiar mé-

todos de trabajo, mejorar procedimientos de puesta en marcha y disminuir la mortalidad infantil con dispositivos a prueba de error (poka-yoke). Se aumenta el $MTBF_{Sistema}$ reduciendo los gastos operacionales.

√ Optimizar los procesos internos del área a través de una gestión administrativa eficiente y capacitar a los analistas para que adquieran las competencias necesarias.

Pasos del Pilar Planeado

Desplegar el Pilar MP requiere transitar 6 Pasos. En el primero, según muestra la tabla 7.4.2, se define el criterio para priorizar los equipos (criticidades) y, a partir de ese criterio, se seleccionan las máquinas sobre las que se desplegará el Pilar. Luego, debe reunirse la mayor cantidad de información para diagnosticar anomalías.

En el Paso 2, y en fuerte sinergia con MA, se busca eliminar el deterioro acumulado y plantear alternativas de mejora que eviten las fallas recurrentes (crónicas). Una estrategia interesante es replicar, en otros equipos o situaciones similares, las mejoras cuyos resultados fueron positivos.

PILAR: MANTENIMIENTO PLANEADO		
PASO 1	Evaluar el Equipo, su contexto operativo y las condiciones iniciales	- Definir un criterio para priorizar equipos.
		- Seleccionar los equipos y definir su contexto operativo.
		- Reunir datos históricos y medir la duración de las fallas.
		- Establecer el MTBF del equipo y fijar metas.
		- Definir objetivos e indicadores de mantenimiento
PASO 2	Suprimir el deterioro y corregir deficiencias	- Apoyar al MA para consolidar la Condición Básica.
		- Proponer mejoras y rediseños que aumenten el MTBF.
		- Erradicar las fallas crónicas con métodos de mejora continua.
		- Proponer mejoras para los procesos de operación.
PASO 3	Crear o mejorar el Sistema de Información	- Establecer una base de datos para las fallas.
		- Crear un sistema para el manejo de datos.
		- Proponer un modelo para Gestión de la Información (Planificación del Mantenimiento).
		- Controlar los gastos de mantenimiento (presupuesto, gasto real y desvíos).
		- Administrar datos técnicos (historial, planos, despieces), repuestos y materiales.
PASO 4	Mejorar el proceso de Mantenimiento Periódico	- Desarrollar un Modelo Funcional para la Gestión del Mantenimiento Preventivo Periódico (MPP) incluyendo flujogramas, técnicas de decisión, planes, instructivos, etc.
		- Elaborar un plan de mantenimiento periódico en base a criterios de prioridad.
		- Desarrollar estándares de inspección para los especialistas de mantenimiento.
PASO 5	Mejorar el proceso de Mantenimiento Basado en Condición (Predictivo / Proactivo)	- Desarrollar un modelo funcional de Mantenimiento Basado en Condición incluyendo flujogramas, técnicas de diagnóstico, programas y procedimientos.
		- Evaluar las técnicas proactivas y predictivas vigentes, y proponer mejoras.
		- Ampliar el modelo para aquellos modos de falla cuyas características técnicas y económicas lo permitan.
		- Investigar técnicas alternativas de diagnóstico.
PASO 6	Optimizar integralmente el proceso "Mantenimiento Planeado"	- Evaluar la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad de los sistemas prioritarios.
		- Cuantificar el beneficio de las tareas preventivas y predictivas.
		- Plantear objetivos de mejora para los costos de mantenimiento.

Tabla 7.4.2
Resumen de los 6 Pasos del Pilar Mantenimiento Planeado (MP).

El Paso 3 permite mejorar el Sistema de Información de Mantenimiento y puede hasta incluir la instalación de un nuevo Sistema Informático. El sistema escogido debe permitir gestionar todo el modelo funcional del área; esto es, emitir OT, planificar y calendarizar rutinas preventivas, predictivas y detectivas, registrar y controlar los gastos de repuestos, mano de obra y servicios de terceros, registrar las fallas y los periodos de detención, almacenar planos y datos técnicos, administrar el consumo de repuestos, confeccionar presupuestos, etc.

Lo cierto es que un software, aún poderoso, no podrá por sí mismo disminuir la frecuencia de las fallas y resolver todos los problemas. Como se dijo con anterioridad, los sistemas proveen datos, la información sólo es generada por las personas. Sólo la conjunción de una rica base de datos y el poder de análisis de los especialistas, pueden mejorar el diagnóstico de averías, morigerar el impacto de los modos de falla y reducir los gastos de mantenimiento.

Los Pasos 4 y 5 buscan optimizar los procesos de mantenimiento periódico y condicional con el desarrollo e implementación de estándares específicos. También requiere la investigación de nuevos métodos para diagnosticar fallas sintomáticas, ejecutándolos con personal propio o contratando servicios externos. Si se escoge la segunda opción, Ingeniería de Mantenimiento tiene que conocer en profundidad cada técnica y ajustar el intervalo $\Delta t_{S\,F}$ para cada modo de falla en conjunto con el prestador del servicio.

Finalmente el Paso 6, integra y consolida los Pasos anteriores mejorando el proceso de gestión completo. La meta es aumentar la eficiencia de las acciones de mantenimiento desarrollando tecnología moderna, racionalizando el consumo de partes, nacionalizando piezas de recambio, reduciendo los tiempos de ejecución, aumentando la vida útil de componentes o aplicando técnicas de decisión como el RCM o el FMEA.

Auditorias de Paso en el MP

La figura 7.4.9 muestra una planilla para una Auditoria de Paso 2 del Pilar MP.

Nombre de la Empresa	Auditorias de Paso Pilar Planeado	Código	MP-P2
		Revisión	3
		Fecha	08/11/2006
		Página	1 de 1

	MANTENIMIENTO PLANEADO	REFERENCIAS	
	Auditoria de Paso 2: Suprimir el deterioro y corregir deficiencias	Aprobado	≥ 80%
Planta/Sector:	Fecha: / Área / Sistema:	Auditor/es:	

ASPECTOS AUDITADOS	#	DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS AUDITADOS	Malo — Muy Bueno 0	1	2	3	4	Obs.
Generalidades	1	¿Qué es TPM?, ¿pueden los miembros del equipo Planeado (ME) definir el Mantenimiento Autónomo (MA) y el Mantenimiento Planeado (MP)?						
	2	Los integrantes de MP, ¿han capacitado a los ME Autónomo en inspección básica y lubricación?						
	3	¿Hay evidencia de transferencia de tareas al MA en lo referente a diagnóstico de averías y restauración de partes componentes?						
Soporte al MA (Condición Básica)	4	Los estándares de IOA de Condición Básica, ¿han sido revisados y validados por MP?						
	5	Las nuevas revisiones de los estándares de IOA, ¿son validadas por MP?						
	6	Las rutinas de Planeado, ¿son ajustadas de acuerdo a los nuevos estándares de IOA?						
	7	Los ME Autónomo, ¿han recibido entrenamiento en campo por parte de MP en habilidades de inspección y detección de anomalías o desvíos?						
	8	¿Se han desarrollado y son efectuadas las auditorías técnicas de Condición Básica?						
Corrección de deficiencias	9	El equipo MP, ¿tiene identificado los errores de diseño o las deficiencias de proceso?						
	10	¿Se utiliza la herramienta Mejora Enfocada para resolver debilidades técnicas de diseño que causan fallas crónicas u otros inconvenientes?						
	11	Las mejoras alcanzadas, ¿son replicadas en equipos o sistemas similares?, ¿hay evidencia?						
Rutinas de Mantenimiento	12	¿Existen Rutinas de Mantenimiento estandarizadas y de cumplimiento obligatorio, incluyendo la calibración de instrumentos de medición?						
	13	Los Planes y Rutinas de Mantenimiento, ¿se revisan frecuentemente, al menos una vez al año?						
	14	¿Existe un indicador que mide el grado de cumplimiento de las Rutinas de Mantenimiento?						
	15	El indicador de cumplimiento, ¿tiene objetivos concretos y mensurables?						
	16	Las Rutinas de Mantenimiento, ¿se revisan y mejoran en función de los resultados obtenidos en equipos de la misma tecnología?						
Fallas Recurrentes y Soporte en Seguridad	17	¿Existe un sistema en el que se registran las fallas recurrentes?						
	18	¿Se llevan a cabo regularmente Análisis de Fallas (ADF's) y se implementan los planes de acción surgidos?						
	19	¿Existe un análisis regular de las fallas que obedecen a errores de operación?						
	20	Los especialistas de MP, ¿dan soporte técnico para analizar fallas con perjuicio en Seguridad?						
Fijación de Objetivos	21	¿Existen indicadores que miden la gestión de Mantenimiento (Costos, Materiales, Repuestos, Mano de Obra, Monto de Servicios Contratados, etc.?, ¿se analizan regularmente?						
	22	La secuencia seguida en el despliegue del Paso actual, ¿está alineada con el Master Plan?						
Cumplimiento de Objetivos	23	¿Se controlan los indicadores propuestos y se cumplen los objetivos?						
	24	¿Existe una mejora concreta en todos los objetivos propuestos?						
	25	¿Se ha evaluado la necesidad de reconsiderar algún indicador u objetivo planteado inicialmente?						

Observaciones:	TOTAL:	PUNTOS 0	
	Firmas del Equipo	Aprobado:	Desaprobado:

Figura 7.4.9
Formato característico para Auditorias de Paso 2 (Pilar Planeado).

Consideraciones Especiales

Al igual que lo hecho con el MA, destacamos algunas consideraciones a tener en cuenta.

√ **Priorización y Estrategia de Mantenimiento**. El comentario del siguiente párrafo servirá de ayuda para esclarecer algunos conceptos acerca de la **criticidad**.

El Pilar MP requiere priorizar los equipos según su impacto en el negocio por medio de Matrices de Criticidad (*Ver Anexo VI "Guía práctica para estimar Criticidades"*). Sin embargo, se cae reiteradamente en el error de intentar relacionar el nivel de criticidad del equipo, con la estrategia de mantenimiento[1] necesaria para evitar sus fallas.

Muchas organizaciones priorizan los equipos, por ejemplo, con A, B o C, de acuerdo a distintos criterios. Incluso hasta se utiliza un sistema de puntuación según el cual cada equipo adquiere un puntaje global dado por la suma de puntos parciales según el perjuicio en producción, calidad, seguridad, costos, medio ambiente, etc. Esto es correcto únicamente a los fines de priorizar y encontrar la mejor secuencia (orden) para emplear los recursos disponibles; es decir, para determinar los activos en los que, si eliminamos sus fallas, obtendremos los mayores beneficios.

El error es utilizar tal categorización para proponer, por ejemplo, que aquellos equipos agrupados bajo la categoría A (criticidad mayor), se les **deba** aplicar tal o cual tipo de mantenimiento. No es válido suponer que la estrategia depende solamente de la criticidad.

La trampa es considerar que existen tipos de mantenimiento más eficaces o *mejores* que otros; y que si las averías del activo tienen consecuencias graves, entonces hay que someterlo a *todos los tipos de mantenimientos existentes*. El concepto, ya caído en desuso, de *"cuanto más hago mejor"*.

Aunque la avería de un equipo tenga consecuencias catastróficas, puede no ser posible técnicamente realizar, por ejemplo, rutinas predictivas o preventivas y habrá que recurrir a otra estrategia.

Otro factor que influye en la confusión y lleva a vincular *"criticidad con estrategia"* es creer en la paradoja de la inversa que dice lo siguiente. *"Siendo que hay equipos sobre los que no vale la pena realizar ciertas rutinas de mantenimiento (como predictivas o preventivas) porque las consecuencias de sus fallos no las justifican (**baja criticidad**), entonces lo contrario es cierto". Es decir, "si un activo es muy **crítico** habrá que aplicarle todos los tipos de mantenimiento disponibles"*. Lamentablemente esto, a menudo, no es posible ni útil pues en realidad la estrategia de mantenimiento depende del patrón de fallas que rige a los modos de falla y a los perjuicios que éstos provocan.

*En resumen, una **baja criticidad** (dependiendo de cómo sea evaluada) puede abolir la aplicación de un tipo de mantenimiento; por el contrario, una alta criticidad no es condición suficiente para efectuar un tipo de mantenimiento.*

√ **Capacitación**. Es indispensable obtener recursos económicos suficientes para capacitar al personal especialista, tanto en labores técnicas como administrativas.

Así mismo, un gran objetivo de los especialistas de MP es llevar adelante planes de capacitación permanentes para los ME del Autónomo y en el propio lugar de trabajo; es decir, *al pie de la máquina*.

√ **Gastos de Mantenimiento**. Muchas tareas recomendadas por los Pasos de este Pilar insumen elevados gastos, y hay industrias que no están en condiciones de afrontarlos. Mantenimiento debe escoger aquellos despliegues con retorno económico inmediato.

√ **Histórico de Fallas**. El TPM plantea que es necesario contar con un abultado historial de fallas para establecer el momento más oportuno de realizar las acciones Pro-activas. No obstante, la experiencia de los especialistas cuando se administra adecuadamente, es lo más eficaz para evitar fallas. Tales fundamentos fueron ya volcados en el Capítulo 2.

---

1 Recordamos que se denomina Estrategia de Mantenimiento al conjunto de actividades de Mantenimiento que se aplican sobre un equipo con el fin de evitar las fallas o minimizar sus consecuencias.

√ **Fallas Recurrentes**. Una tarea fundamental del Pilar MP (con ayuda del Pilar MA) es disminuir fallas crónicas o recurrentes. Se deben registrar las fallas de mayor duración y/o repetición, e impulsar herramientas de Análisis de Fallas. El resultado de estos análisis serán acciones **concretas** para evitar la reiteración. El grupo de Mantenimiento Planeado puede impulsar el uso del ADF (sección 7.3.5) o implementar el proceso DMM (Daily Management Maintenance) descripto en la sección 12.5 del Capítulo 12. Solamente una acción conjunta entre el personal de Autónomo y Planeado, permite acercarse a la meta del *cero averías*.

√ **Indicadores de Mantenimiento**. Todo proceso debe gestionarse a través de indicadores. Durante la implementación y consolidación de este Pilar (o cualquier otro) es preciso usar *indicadores claves de performance* (KPI[1]).

7.4.4.3 Pilar - Mejora Enfocada ó Individual (Kobetsu Kaizen)

Como su nombre lo indica, las actividades desarrolladas en este Pilar **enfocan** u orientan los esfuerzos de un grupo de personas para resolver problemas *específicos*, *concretos* y de cierta *complejidad*. Puede aplicarse, por ejemplo, para mejorar la eficiencia global de un equipo o de un sistema productivo completo.

Se forma un equipo interdisciplinario con personal de producción, operadores, especialistas de mantenimiento, ingenieros, o cualquier integrante de la compañía que conozca y tenga alguna vinculación con el tema a resolver. Luego, se aplica un método del tipo paso a paso que incluye al conocido Ciclo de Deming[2] o PHVA (**P**lanificar - **H**acer - **V**erificar - **A**ctuar). El Pilar Mejora Enfocada hace uso de esta herramienta (PHVA) y pone en marcha un círculo virtuoso para la resolución de problemas. El primero y segundo Paso, aquí propuestos, son previos al ciclo de mejora PHVA.

Pasos del Pilar Mejora Enfocada

El primer Paso es seleccionar el problema a resolver (pérdida) y darle un formato y nombre de Proyecto; por ejemplo, Proyecto "XX". Esto ayudará a gestionarlo eficazmente. Es preferible seleccionar temas que estén afectando a la organización significativamente. El Master Plan de TPM dará prioridad a los problemas con mayor perjuicio para la compañía en cuanto a seguridad, calidad, consumo energético, disponibilidad, cuellos de botella, costo excesivo, etc. Luego, se determina el orden de resolución (a igualdad de impacto comenzar por los proyectos que presumiblemente sean más fáciles de resolver).

Evitar escoger temas que se encuentren bajo la gestión de otros procesos de mejora como los desplegados por el Pilar Autónomo o Planeado, reservando la potencia del Pilar Mejora Enfocada para los de mayor complejidad o crónicos y no resueltos con métodos tradicionales. También pueden seleccionarse pérdidas relacionadas a procedimientos operativos deficientes. Rediseñar una máquina con problemas de Confiabilidad o Mantenibilidad, puede ser motivo para iniciar un Proyecto de Mejora Enfocada.

El coordinador central TPM es responsable por el control y seguimiento de los Proyectos, y debe conseguir el respaldo de la Dirección para el éxito del programa.

Los factores que más disparan Proyectos de Mejora Enfocada suelen ser los siguientes:

√ Alcanzar objetivos estratégicos de la alta Dirección.
√ Aumentar la capacidad productiva en procesos de fabricación.
√ Mejorar procedimientos de Operación o Mantenimiento.
√ Eliminar fallas crónicas o recurrentes y aumentar la eficiencia.
√ Mejorar la Calidad de los Productos (o Servicios).
√ Reducir los plazos de entrega de Repuestos y Materiales.
√ Mejorar el diseño para aumentar Confiabilidad o Mantenibilidad.
√ Disminuir las pérdidas por reproceso en productos intermedios.
√ Reducir el tiempo de parada programada (MTTR) para tareas de mantenimiento.
√ Disminuir los tiempos *muertos* por cambio de formato en líneas productivas.
√ Eliminar instalaciones obsoletas que aumentan los gastos y el riesgo de accidentes.

---

1 Del término en ingles Key Performance Indicators. Ver sección 12.4, Capitulo12.

2 W. Edwards Deming (1900-1993) nació en Iowa USA y desarrolló profundos estudios de estadística. Conocido, entre otras cosas, por ser el impulsor del Ciclo de Mejora PDCA (Plan, Do, Check and Act) ó PHVA que lleva su nombre.

El Paso 2 requiere formar un **Grupo de Trabajo Funcional** (para el Proyecto "XX") convocando a las personas más relacionadas con el tema. Puede ser personal de ingeniería, mantenimiento, producción, compras, almacenes, ventas, ingeniería de proceso, calidad, proveedores o clientes. El grupo interdisciplinario es conducido por un Líder y se disuelve una vez finalizado el proyecto.

En el Paso 3 comienza el proceso iterativo PHVA, evaluando la situación actual y cuantificando las pérdidas o el riesgo (Etapa "**V**erificar"). Si la mejora tiende a disminuir pérdidas materiales, es conveniente evaluarlas en términos económicos. Sin embargo, muchos despliegues de Mejora Enfocada son tremendamente útiles para disminuir riesgos que hayan sido calificados como **Altos** por herramientas de Análisis de Riesgo Industrial como el HAZOP. Estas herramientas de análisis[1], identifican y cuantifican riesgo, mientras que un Proyecto de Mejora Enfocada satisface las recomendaciones para reducirlo proponiendo contramedidas. El resultado del Paso es un informe detallado de toda la información disponible y de los objetivos planteados. Los objetivos fijados deben ser concretos, medibles y alcanzables. Se requiere un fuerte respaldo de la Dirección de Planta y nunca es recomendable que el Proyecto se extienda más allá de los 6 meses.

Durante el Paso 4 (Etapa "**A**ctuar") se hace un diagnóstico completo del problema estudiado. No obstante, si el Proyecto busca corregir problemas en activos productivos, se recomienda previamente tener asegurado el estado de Condición Básica (lubricación, limpieza, ajustes, etc.).

Para emitir un diagnóstico, son útiles herramientas como el diagrama Causa – Efecto, listas de verificación, ADF's, Análisis P-M, técnica del Por qué – Por qué, 5W + 1H[2], etc.

El Paso anterior detecta las causas que originan el problema; ahora debemos planificar su eliminación. La eliminación de las causas requerirá la intervención de todos los miembros del Grupo de Trabajo y, seguramente también, de personal externo.

Durante el Paso 5 (Etapa "**P**lanificar"), se coordinan las acciones que eliminarían las causas. Para ello es preciso relacionar *acción sugerida con probable causa*. Toda acción debe tender a eliminar una causa, de lo contrario no tiene sentido ejecutarla. Es importante calcular el tiempo para implementar cada acción, los recursos que insumirá y el responsable de su ejecución. Posiblemente ciertas acciones deban ser realizadas por el departamento de Mantenimiento o por Proveedores. De igual manera tendrán un responsable dentro del grupo quien será el encargado de gestionarlas para que se cumplan en tiempo y forma. Son de utilidad los diagramas de Gantt para gestionar el Proyecto. Un diagrama de Gantt permite relacionar todas las tareas, coordinar fecha de inicio y fin de cada una, estimar la demanda y oferta de recursos, identificar la secuencia de los trabajos, etc.

El Paso 6 (Etapa "**H**acer") implementa las mejoras planificadas en el Paso 5. Resulta ventajoso que los ME del Pilar Autónomo y del Pilar Planeado estén de acuerdo y hayan participado de las decisiones que tengan que ver con las acciones tomadas en su sector, esto compromete al personal. Además, los logros se comparten con todos los que, de alguna u otra forma, tienen que ver con el activo o proceso en cuestión. Son necesarias reuniones periódicas de revisión de avance. Las mejoras podrían incluir nuevos procedimientos de operación o mantenimiento, herramientas necesarias para ejecutar Estándares de Inspección y OPL's.

Durante el Paso 7 se miden los resultados. La forma de medir es coincidente con la utilizada en el Paso 3 y los resultados se cotejan con las metas cuantitativas propuestas. Deben definirse e implementarse las acciones necesarias para garantizar que los resultados satisfactorios se sostengan en el tiempo y no regresar a la condición inicial (antes del despliegue). Los logros se publican y los integrantes del grupo son reconocidos formalmente por la compañía a través de la coordinación central del TPM.

---

1 Ver apartado 5.2.4 "Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo", Capítulo 5.
2 Ver sección 7.3.5 "Técnica de las 5W + 1H y el Análisis de Fallas (ADF's)".

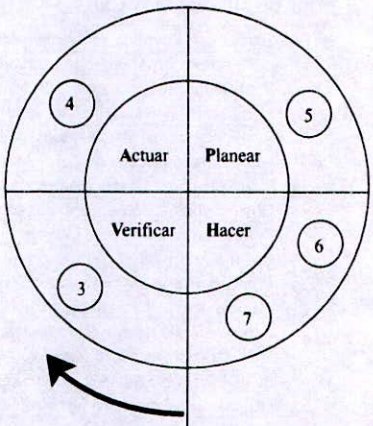


Figura 7.4.10 Ciclo de Deming (PHVA) utilizado en el Pilar Mejora Enfocada.

- (Paso 3) Medir el estado actual y establecer objetivos.
- (Paso 4) Analizar las causas (Diagnóstico).
- (Paso 5) Planificar las acciones de mejora.
- (Paso 6) Implementar las mejoras propuestas.
- (Paso 7) Evaluar los resultados.

- Seleccionar el tema (Paso 1)
- Crear la estructura (Grupo de Trabajo) (Paso 2)

Un resumen de los Pasos de este Pilar, se muestra en la siguiente tabla 7.4.3.

PILAR: MEJORA ENFOCADA		
PASO 1	Seleccionar el tema (Proyecto de Mejora "XX")	- Seleccionar la pérdida, problema o defecto a corregir. - Darle un nombre al Proyecto y difundirlo: Proyecto "XX". - Verificar que no exista en marcha otro proceso de mejora asociado al mismo tema. - Planificar las actividadades que desarrollará el Grupo de Trabajo.
PASO 2	Formar el Grupo de Trabajo	- Reunir el personal idóneo que participará del Proyecto. - Difundir la convocatoria al resto de la organización. - Establecer con el Grupo, el alcance y los objetivos del Proyecto. - Obtener el respaldo necesario por parte de la Dirección.
PASO 3 (V)	Medir el estado actual y proponer objetivos de mejora	- Evaluar la situación actual (recolectar datos e información). - Cuantificar la pérdida o el riesgo actual. - Confeccionar un informe cuantitativo del problema (pérdida o riesgo). - Plantear objetivos concretos, medibles y alcanzables. - Informar a la Dirección sobre la situación actual y sobre los resultados esperados al finalizar el despliegue (Objetivos).
PASO 4 (A)	Analizar las causas del problema (Diagnóstico)	- En mejoras sobre Equipos, asegurar Condición Básica. - Diagnosticar el problema por medio de: - Diagrama Causa - Efecto (Diagrama de Ishikawa). *Sección 7.3.4.* - Análisis de Mecanismos de Falla (Physical Mechanism). *Sección 7.3.6.* - Técnica del ¿Por qué - Por qué?. *Sección 7.3.3.* - Análisis FMEA. Apartado 5.2.4.1 del *Capítulo 5.* - Análisis Causa - Raíz de Falla (RCA). *Sección 7.3.7.* - Tormenta de Ideas (Brainstorming). *Sección 7.3.2.* - Hacer un Pareto con las causas detectadas. *Sección 7.3.1.*
PASO 5 (P)	Planificar las acciones de mejora	- Formular un Plan de Acción en función del Pareto. - Proponer varias alternativas de mejora para cada causa detectada. - Hacer un análisis de riesgo para cada mejora propuesta. - Definir un responsable para implementar cada acción. - Gestionar las acciones integralmente (Diagrama de Gantt). - Dar soporte técnico y administrativo a las mejoras.
PASO 6 (H)	Implementar las mejoras propuestas	- Compartir las propuestas de mejora con el personal del sector y lograr su compromiso. - Proveer los recursos suficientes para realizar las mejoras. - Implementar las mejoras. - Verificar si las mejoras fueron efectuadas de acuerdo al Plan.
PASO 7	Evaluar los resultados del Plan contra los Objetivos	- Medir los resultados usando los mismos indicadores del Paso 3. - Comparar los resultados con los objetivos. - Si los objetivos no se alcanzan, volver al Paso 4. - Comunicar las metas alcanzadas a toda la Organización. - Sostener los resultados en el tiempo, implementando o modificando procedimientos de trabajo (Producción, Mantenimiento, Calidad, etc.).

Ciclo Deming (PHVA)

Tabla 7.4.3
Resumen de los 7 Pasos del Pilar Mejora Enfocada.

Auditorias de Pilar Mejora Enfocada

La figura 7.4.11 muestra una planilla para una Auditoria del Pilar Mejora Enfocada.

Nombre de la Empresa	Auditoria de Pilar Mejora Enfocada	Código	ME-Pilar
		Revisión	2
		Fecha	08/11/2007
		Página	1 de 1

	MEJORA ENFOCADA (TPM)		REFERENCIAS	
	Auditoria de Pilar: Mejora Enfocada		Aprobado	≥ 80%
Planta/Sector:	Fecha:	Mejora Enfocada: Proyecto "XX"	Auditor/es:	

ASPECTOS AUDITADOS	#	DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS AUDITADOS	Malo --- Muy Bueno 0	1	2	3	4	Obs.
Priorización	1	¿Existe un criterio corporativo para establecer prioridades de pérdidas o riesgos?						
	2	La elección del tema para el Proyecto, ¿se ajustó al criterio establecido?						
	3	¿Existe evidencia de un análisis de factibilidad previo para la resolución del problema?						
Grupo de Trabajo	4	Los integrantes del Grupo, ¿fueron escogidos de acuerdo a su conocimiento e idoneidad?						
	5	¿Se trata de un Grupo de Trabajo interdisciplinario?						
	6	En el Grupo de Trabajo, ¿hay integrantes del Pilar Autónomo y del Pilar Planeado?						
	7	Los miembros de equipo Autónomo y Planeado, ¿conocían la existencia del Proyecto?						
	8	El Grupo de Trabajo, ¿fue conducido por un Líder?						
Objetivos	9	¿Fue cuantificada la pérdida o el riesgo antes de la mejora?						
	10	Los objetivos planteados, ¿son concretos, medibles y alcanzables?						
	11	¿Fue informada la Dirección sobre el Proyecto y sobre los objetivos propuestos?						
Análisis de Causas (Diagnóstico)	12	Los datos usados para el diagnóstico, ¿son confiables y corresponden a registros auditables?						
	13	¿Existe un criterio para verificar los resultados en campo?						
	14	Los criterios de verificación, ¿fueron los adecuados?						
	15	¿Se han definido o sugerido nuevas formas de registrar los resultados?						
	16	¿Se utilizaron herramientas específicas de análisis?, (Ej: Diagrama de Ishikawa, hojas de chequeo, Análisis P-M, técnica del Por qué - Por qué, 5W + 1H), ¿cuáles?						
Planificación	17	¿Se ha sugerido un número razonable de acciones para cada causa?						
	18	¿Las acciones fueron planificadas con un diagrama de Gantt?						
	19	Cada acción, ¿tuvo un responsable integrante del Grupo de Trabajo?						
Implementación de las Acciones	20	Los miembros de equipo Autónomo y Planeado, ¿estuvieron comprometidos con el Proyecto?						
	21	¿Se realizaron reuniones periódicas para revisar el avance de las acciones implementadas?						
	22	Las acciones, ¿se implementaron de acuerdo al Plan original?						
Resultados	23	¿Los resultados fueron medidos de la misma manera que en el Paso 3?						
	24	¿Se alcanzaron los objetivos propuestos originalmente?						
	25	Las metas alcanzadas, ¿fueron comunicadas a toda la Organización?						

Observaciones:	TOTAL:	PUNTOS 0	
	Firmas del Equipo	Aprobado:	Desaprobado:

Figura 7.4.11
Formato característico para Auditorias de Pilar Mejora Enfocada.

Consideraciones Especiales

√ **Proceso Informal.** La mayor parte de las organizaciones desarrollan de manera informal procesos de Mejora Enfocada. Los responsables del mantenimiento, junto al personal de operaciones, frecuentemente introducen mejoras en los procesos productivos o en los equipos sin hacer uso de un procedimiento formal. Si bien pueden obtenerse buenos resultados de esta forma, hay veces que las acciones sugeridas quedan inconclusas por falta de seguimiento o no se registran, provocando en el futuro problemas de mantenibilidad. Por el contrario, si se opta por el Pilar Mejora Enfocada el Proyecto queda contenido en un marco de referencia conceptual y formal, integrando los conocimientos del personal más idóneo y aprovechando de cada uno su máximo potencial.

√ **Master Plan y Mejora Enfocada**. Es preciso que la coordinación central TPM incluya en el Master Plan de la Compañía los objetivos esperados del Pilar Mejora Enfocada. Así mismo, debe registrarse el progreso de cada Proyecto implementado para evitar el abandono y asegurar los retornos comprometidos.

√ **Mejoras y nuevos Modos de Falla**. Ciertas mejoras incorporan componentes, equipos o sistemas funcionales. Evitar las mejoras que para solucionar un problema crean otros. Todo despliegue de Mejora Enfocada debe analizar la posible incorporación de nuevos modos de falla. Dicho análisis también es útil para medir el costo - beneficio de la mejora adoptada.

√ **Solución simple o compleja**. La experiencia dice que las mejores soluciones a los problemas son mayormente simples y no complejas. Ante dos posibles soluciones a un mismo problema (técnico y/o administrativo) optar, a primera vista, por la más simple.

7.4.4.4 Pilar - Gestión Temprana (o Inicial)

El cuarto Pilar, denominado Gestión Temprana (GT), tiene como objetivo garantizar que las nuevas Unidades Funcionales (componentes, equipos o sistemas) operen satisfactoriamente desde la puesta en marcha. Todo Proyecto de Inversión debe alcanzar rápidamente el régimen nominal de producción (capacidad deseada), sin fallas iniciales ni arranques reiterados. La metodología asegura también que el tiempo previsto entre el diseño y la puesta en marcha se cumpla conforme a planificación; es decir, sin retrasos.

Se mencionó en el Capítulo 1 que, en rigor, debe pensarse en Mantenimiento desde la idea misma de instalar un equipo. Tener en cuenta al Mantenimiento desde la concepción de un proyecto, permite desarrollar equipos confiables, mantenibles y fáciles de operar. De lo contrario, será necesario corregir los defectos durante la utilización, afectando la disponibilidad y los gastos operativos.

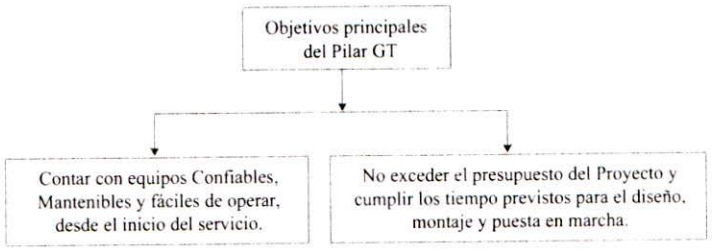


Figura 7.4.12 Objetivos principales del Pilar Gestión Temprana.

Por los factores antes mencionados este Pilar se denomina **Gestión Temprana**, pues pretende eliminar precozmente los problemas de diseño o errores de fabricación[1]. El inicio de una operación industrial sin inconvenientes es definido por TPM como *arranque vertical*. Un arranque vertical es aquel que hace posible que la máquina comience a producir inmediatamente, libre de defectos y sin riesgos para la seguridad. El Pilar GT evita descuidar, durante la fase de diseño, factores de Seguridad, Confiabilidad, Mantenibilidad y Operación. Es común escuchar comentarios como: *"Éstas son las condiciones de diseño del equipo, no podemos hacer más desde Mantenimiento"*. Esto es correcto cuando el equipo ya fue instalado y no hubo GT, debiéndose recurrir a mejoras de producto, proceso o instalación. Sin embargo, el objetivo de este pilar es aplicar criterios de gestión capaces de minimizar las dificultades post-puesta en marcha. Los diseñadores, fabricantes, proveedores y montadores, tienen mucha responsabilidad en este proceso de mejora temprana.

Entre las herramientas de soporte para implementar Gestión Temprana se encuentran el FMEA y el RCD (Reliability Centred Design). Con respecto al seguimiento administrativo del Proyecto, se destaca la importancia de usar herramientas de gestión de proyectos, diagramas de Gantt, listados de seguimiento, listados de recepción y aprobación de productos, etc.

---

1 Ver sección 1.4.8 "Mantenimiento Previsivo" del Capítulo 1.

El Master Plan TPM debe priorizar la aplicación del Pilar GT en aquellos Proyectos que aporten la mayor rentabilidad o el mayor beneficio en materia de seguridad. Así mismo, la coordinación central TPM debe monitorear el progreso de cada proyecto y aprovechar la experiencia para replicarla en futuros emprendimientos. Gestión Temprana es un *proceso* de mejora cuya implementación permite:

- √ Alcanzar la velocidad nominal de operación (capacidad de producción) rápidamente; es decir, asegurar un arranque vertical.
- √ Cumplir el plazo planificado entre Diseño y Producción nominal.
- √ Lograr arranques seguros, rápidos y libres de defectos.
- √ Alcanzar la Confiabilidad esperada del equipo desde la puesta en marcha.
- √ Instalar equipos fáciles de diagnosticar y reparar (bajo MTTR), y con bajo costo para efectuar Acciones Pro-activas.
- √ Que las piezas nuevas instaladas sean totalmente compatibles con los repuestos existentes (intercambialidad de repuestos).
- √ Garantizar el cumplimiento de los objetivos por los cuales el proyecto fue autorizado.
- √ Evitar accidentes o impacto ambiental durante el montaje y puesta en marcha.
- √ Instalar equipos con bajo Costo de Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Cost)[1].
- √ Que los equipos nuevos satisfagan las normas de la empresa.
- √ Aprovechar el aprendizaje para otros proyectos de inversión.
- √ Que los nuevos equipos sean, hasta su obsolescencia, seguros, confiables, mantenibles, eficientes, económicos y fáciles de operar.

Pasos del Pilar Gestión Temprana

El proceso de Gestión Temprana aplicado a un nuevo equipo o instalación, puede desarrollarse a través de 5 Pasos. En el Paso 1 se establecen los criterios de diseño a satisfacer por el Proyecto; es decir, se cuantifican la Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, Seguridad y Operabilidad esperada. Los Pasos 2 y 3 se ocupan de la planificación, el diseño y documentar la información, y son de despliegue simultáneo. Se usan herramientas de análisis como el FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) y el HAZOP (*Hazard and Operability Analysis*). El primero determina los potenciales problemas de un equipo sometiéndolo a una crítica objetiva y severa, mientras que el HAZOP es una técnica orientada a identificar situaciones de peligro[2].

El arranque o puesta en marcha es vital para el éxito del programa. En el Paso 5 se verifican las condiciones de diseño en campo. Es la oportunidad de comprobar que se cumplan todos los criterios de funcionamiento planificados en el diseño.

El Paso 6 consiste en verificar el régimen nominal de operación (testing) durante un periodo de prueba previamente establecido; es decir, validar el diseño en condiciones reales de operación. Las acciones surgidas de estas pruebas, deben ejecutarse inmediatamente. El hallazgo de los defectos deberá tener una rápida solución. Es aconsejable mantener reuniones de coordinación con los integrantes de los grupos de trabajo en cada fase del proyecto.

Un resumen de los puntos más importantes de cada Paso se muestra en la tabla 7.4.4.

1 Ver Anexo IX "Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LLC - Life Cycle Cost)".

2 Ver apartado 5.2.4 "Herramientas de Gestión para el Análisis de Riesgo", Capítulo 5.

PILAR: GESTIÓN TEMPRANA		
PASO 1	Selección y justificación del Proyecto	- Seleccionar el Proyecto de Inversión (sujeto al Pilar Gestión Temprana). - Definir un líder de Proyecto y un equipo de colaboradores (en lo posible exclusivos). - Realizar estudio de Factibilidad Técnica y Económica. - Establecer criterios de diseño (confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, seguridad, operabilidad, etc.). - Asegurar la partida presupuestaria para el Proyecto (incluido el despliegue de GT). - Emitir los pliegos de condiciones para el Diseño, Fabricación y Montaje.
PASO 2	Planificación y Diseño	- Seleccionar Proveedores. - Investigar las debilidades de diseños similares. Capitalizar la experiencia adquirida durante el Mantenimiento y la Operación para robustecer el nuevo diseño. - Estimar el Costo de Ciclo de Vida (LCC) para cada alternativa propuesta. - Optimizar el diseño con simulación de fallas aplicando FMEA y RCD. - Asegurar que el Proyecto satisfaga los criterios de diseño del Paso 1. - Implementar herramientas de control y seguimiento de Proyectos. - Evaluar los proveedores para asegurar productos y servicios de calidad. - Capacitar a operadores y mantenedores sobre la nueva Unidad Funcional. - Implementar listas de chequeos para fabricación y recepción de Equipos o Servicios.
PASO 3	Información y Documentación	- Formar un Grupo de Trabajo para liderar la Puesta en Marcha. - Efectuar Análisis de Riesgo (Ej: HAZOP) y mejorar el diseño según recomendaciones. - Desarrollar Manuales de Operación y Planes de Mantenimiento. - Clasificar la información técnica (layout, planos, fichas técnicas, especificaciones, lista de repuestos, certificados de garantía, etc.). - Implementar Gestión Visual para tareas de Mantenimiento y Operación. - Desarrollar estándares de limpieza, lubricación, ajuste, etc. que aseguren la Condición Básica desde el inicio del servicio. - Desarrollar listas de chequeos y cronogramas de Puesta en Marcha.
PASO 4	Instalación y Puesta en Marcha	- Monitorear el traslado, entrega, montaje e instalación del equipamiento. - Someter el Proyecto a los chequeos de instalación. - Verificar que se cumplan las normas de Seguridad. - Realizar los chequeos de Puesta en Marcha.
PASO 5	Pruebas y Chequeos de Régimen	- Corregir rápidamente los defectos que se manifiestan cuando la instalación opera a "velocidad nominal". - Comprobar los parámetros de diseño y verificar la capacidad operativa. - Asegurar la existencia de los repuestos definidos en el Paso 3. - Verificar el cumplimiento de los Planes de Mantenimiento. - Verificar el cumplimiento de los Procedimientos de Operación. - Efectuar Test Operacionales de post-Puesta en Marcha. - Validación definitiva de la instalación y entrega formal a Producción.

Tabla 7.4.4
Resumen de los 5 Pasos propuestos aquí para el Pilar Gestión Temprana.

La tabla 7.4.5 muestra una *Lista de Chequeo y Verificación* característica utilizada en la construcción de equipos industriales y que debe adaptarse a las condiciones de cada proyecto.

Lista de Chequeo y Verificación		
Máquina / Proveedor:	**Fecha:**	**Versión**
Responsable del Chequeo:		**Sí / No**
¿Se encuentran todos los componentes conforme a especificación y requerimiento de diseño?		
Las listas de materiales, partes y repuestos, ¿están completas?		
Los componentes mecánicos, eléctricos y cañerías, ¿están ensamblados o montados correctamente?		
Los circuitos electrónicos y de instrumentación, ¿están ensamblados o montados correctamente?		
¿Se encuentran los subsitemas montados o ensamblados correctamente?		
Los dispositivos de seguridad, ¿cuentan con suficiente señalización?		
Los lugares que representan un riesgo para la operación, ¿poseen acceso limitado?		
¿Se ha realizado una búsqueda de fallos ocultos en las funciones de seguridad (cortes de emergencia, alarmas, señales de seguridad, etc.?		
¿Se ha realizado una búsqueda de fallos ocultos en los sensores de seguridad?		
Todas las partes visibles, ¿poseen un buen estado de limpieza?		
Todas las partes de la máquina, ¿están libres de daños aparentes?		
¿Están dentro de los límites normales los registros de temperatura, presión, caudal, etc.?		
¿Están sin pérdidas las cañerías, sistema neumáticos, sistema de lubricación, etc.?		
El sentido de giro en motores, reductores, ventiladores, etc., ¿es el correcto según operación normal?		
¿Están calibrados los instrumentos de medición y existen los certificados correspondientes?		
Los puntos calientes (energizados o bajo fricción), ¿mantienen la temperatura establecida por diseño?		
Las partes móviles o en rotación, ¿están libres de ruidos o vibraciones superiores a los normales de operación?		

Tabla 7.4.5
Ejemplo de Lista de Chequeo y Verificación para la construcción de equipos industriales.

Consideraciones Especiales

√ **Los Proyectos "Llave en Mano" y la Gestión Temprana**. Suele suponerse que los proyectos de inversión bajo la formalidad *llave en mano*, no requieren la aplicación del Pilar Gestión Temprana. El error se basa en creer (lo mismo ocurre con mantenimiento) que es el proveedor (diseñador) quien se encuentra en la mejor condición para satisfacer los requerimientos; y que además, cuenta con todo el *know how*. Lamentablemente esto casi nunca es cierto, por lo que es indispensable acompañarlo durante todo el proceso *diseño - puesta en marcha*. Tal condición de acompañamiento debe dejarse claramente establecida en los pliegos de condiciones contractuales.
El éxito de un Proyecto de Inversión *llave en mano* es responsabilidad del cliente.

√ **Gestión Temprana y Rediseños**. Lo referido hasta aquí respecto al Pilar GT, no sólo es válido para nuevas instalaciones. Puede aplicarse con éxito en rediseños o mejoras mayores, en up-grades y Overhaul de equipos y hasta en Paradas Mayores (Shutdown).

√ **Las Listas de Chequeos son dinámicas**. Las *Listas de Chequeo y Verificación*, como instrumentos de recepción y aceptación de instalaciones, deben actualizarse conforme se adquiere experiencia de otros proyectos. El aprendizaje o los hallazgos trascendentales deben capitalizarse para optimizar futuras implementaciones.

√ **Estandarizar para ayudar a mantener**. Se mencionó que, en la medida de lo posible, es aconsejable que los proveedores adapten sus diseños a las piezas y partes componentes ya existentes en Planta. Los pliegos de condiciones deben referirse a esta necesidad.
Cierta industria tenía tres filtros similares de distinto fabricante, aunque sus funciones productivas eran las mismas. Sin embargo, cada máquina contaba con un ***sistema de lubricación*** *distinto, y ninguna de las piezas era intercambiable. Esto provocaba serios problemas de mantenibilidad y aumentaba el stock inmovilizado de repuestos.*

7.4.4.5 Pilar - Mantenimiento para la Calidad (Hinshitsu Hozen)

Muchos defectos sucedidos durante la fabricación se producen por fallas o averías incipientes en las máquinas. El objetivo principal del Pilar **Mantenimiento para la Calidad** (MC) es evitar, con acciones regulares de mantenimiento o con mejoras (rediseños), pérdidas por calidad en los productos (intermedios o finales). La fuerza del Pilar MC permite acercarse a la meta del cero defecto. Téngase en cuenta que la Empresa en su conjunto, y el sector mantenimiento en particular, tienen que asegurar productos cuyas características satisfagan los estándares de calidad comprometidos por la organización.

Es conocido que ciertos modos de falla provocan efectos desfavorables en la calidad de los productos. Si Mantenimiento es capaz de controlarlos, entonces está en condiciones de controlar la Calidad. El libro *TPM en Industrias de Proceso*[1], establece claramente cuatro factores que afectan la calidad de un producto: equipos, materiales, acciones del personal (habilidad) y métodos. Es muy importante el primer factor porque está fuertemente vinculado al mantenimiento y al tipo de proceso.

La Confiabilidad y la Disponibilidad es tarea de los Pilares ya vistos; el Pilar MC, en su lugar, busca erradicar aquellas causas que producen productos no perfectos. Se considera que las máquinas son potenciales **generadoras de defectos de calidad** y la función Mantenimiento posee técnicas para evitar estos problemas. Los equipos deben ser mantenidos y cuidados de forma tal que no produzcan pérdidas de este tipo. La verificación regular de ciertos parámetros de funcionamiento (fallas sintomáticas) permite identificar y eliminar, a tiempo, anomalías que de lo contrario provocarían serias pérdidas.

Otro aspecto importante que mejora este Pilar, es el sistema productivo. Muchos defectos tienen que ver con deficiencias o pérdidas asociadas al proceso de producción.

---

1 Ver referencia bibliográfica.

Cabe mencionar, por último, que algunas industrias destinan sumas considerables de dinero (pérdidas) a trabajos de reproceso[1]. El reproceso de producto semielaborado provoca pérdidas fáciles de cuantificar. Tales pérdidas, en la mayoría de los casos, justifican sobradamente el despliegue del Pilar Mantenimiento para la Calidad.

Pasos del Pilar Mantenimiento para la Calidad

La primera medida que sugiere la metodología es evaluar la condición actual del sistema con respecto a la calidad. Establecer el punto de partida pone de manifiesto la brecha entre los requisitos de calidad necesarios y la oferta de calidad vigente en el sistema. La tabla 7.4.6 ilustra un resumen de los Pasos del Pilar MC propuesto en esta sección.

PILAR: MANTENIMIENTO PARA LA CALIDAD		
PASO 1	Contexto Operativo, Equipo y Calidad	- Evaluar los factores del Contexto Operativo que afectan la Calidad. - Identificar las partes o elementos del equipo que provocan problemas de Calidad. - Realizar análisis estadísticos para medir Calidad. - Clasificar los defectos por frecuencia de ocurrencia, modo del defecto, origen, gravedad o índice de calidad. Utilizar herramienta FMEA. - Establecer límites para los parámetros o variables de calidad. - Verificar si se cumplen los límites para cada parámetro.
PASO 2	Causas y mecanismos de defecto	- Estudiar los mecanismos de falla que provocan los defectos de calidad, según gravedad determinada en el Paso 1. - Identificar los **modos de falla** asociados a los mecanismos de falla. - Realizar un análisis RCM para determinar las tareas de mantenimiento más efectivas para evitar defectos de calidad. - Realizar análisis PM (Physical Mechanism), proceso RCA (Análisis Causa - Raíz) u otra herramienta, para evitar los defectos recurrentes. - Proponer alternativas de mejora para los defectos crónicos o recurrentes. - Optimizar los diagramas de flujo del proceso y aplicar técnicas de mejoras. - Aplicar el Pilar Mejora Enfocada para las situaciones más complejas.
PASO 3	Implementar las mejoras	- Implementar las mejoras propuestas en los Pasos anteriores. - Asegurar que tales acciones cubran los factores: **Materiales, Equipos, Métodos y Personal**.
PASO 4	Asegurar la Calidad	- Implementar las rutinas de mantenimiento planeado, definidas en el Paso 2. - Implementar técnicas de diagnóstico para detectar fallas sintomáticas que perjudiquen la Calidad. - Desarrollar e implementar estándares de inspección (IOA) para garantizar el estado de Condición Básica conforme a Calidad.
PASO 5	Evaluar las acciones de mejora	- Definir un método para evaluar los resultados de las mejoras. - Medir el resultado de aplicar las acciones de mejora. - Replicar las mejoras con resultado favorable, en otras instalaciones, (siempre que sea técnicamente factible y se justifique económicamente).
PASO 6	Medir y consolidar la Calidad	- Redefinir u optimizar el método para medir la Calidad. - Medir y evaluar regularmente la Calidad. - Optimizar los estudios estadísticos para medir la Calidad. - De aparecer nuevos defectos de Calidad, volver al Paso 2.

Tabla 7.4.6
Resumen de los Pasos del Pilar Mantenimiento para la Calidad.

Nota: Los sistemas de acreditación o certificación en Calidad, otorgados aún por instituciones de prestigio, no reemplazan al Pilar MC; más bien lo complementan.

Puede sintetizarse lo visto hasta aquí diciendo que el Pilar Mantenimiento para la Calidad establece las condiciones necesarias para fabricar productos perfectos (cero defectos) y, luego, sostener tales condiciones en el tiempo.

Consideraciones Especiales

√ **El Pilar MC y la Calidad en Mantenimiento**. Suele confundirse el despliegue del Pilar MC con los procesos de certificación en calidad. Si bien ambos emprendimientos no son excluyentes, la certificación de mantenimiento por normas de calidad externas a la compañía, no reemplaza totalmente el potencial del Pilar MC. Existen muchas oportunidades de mejora referidas a calidad de los productos que una certificación no puede identificar.

1 Un reproceso consiste en recuperar (reciclar) producto de fabricación intermedio o final, cuyos parámetros de calidad están fuera de especificación. Dichas tareas, sobre piezas o materias primas, ocasionan grandes gastos operativos.

√ **Los Pilares MC, ME y MA.** Las acciones de mejora puntuales se implementan con el Pilar Mejora Enfocada. El Pilar MC evita el "cero defectos" en los productos elaborados. Es de suma importancia asegurar la Condición Básica del equipo para alcanzar objetivos de calidad desafiantes, y tal estado de Condición Básica sólo se logra con una aplicación eficaz del Pilar MA.

√ **Calidad y Mantenimiento Basado en Condición.** El tipo de mantenimiento más eficaz para descubrir anomalías prematuramente (fallas sintomáticas), es el Mantenimiento Basado en Condición (Predictivo o Proactivo). En el Capítulo 3 fue posible observar cómo ciertos parámetros característicos de funcionamiento pueden identificarse utilizando técnicas de monitoreo periódico. El sector encargado del mantenimiento basado en condición debe seleccionar los componentes cuyos parámetros *sensibles* pueden dar algún indicio de falla con perjuicio en calidad. Detectar anticipadamente estas fallas sintomáticas, permite reducir las pérdidas por retrabajos o reprocesos costosos.

√ **RCM y el Pilar MC.** Una manera de analizar y eliminar velozmente los problemas de calidad, es aplicando un análisis RCM[1] para las funciones del equipo que guarden una relación con la calidad del producto. Primeramente es necesario acordar los parámetros de calidad exigidos por el producto y luego trabajar sólo sobre las funciones vinculadas a tales requisitos. Para poder integrar este trabajo inicial (sobre calidad) a futuros análisis RCM del equipo, es apropiado designar tales funciones como **Funciones de Calidad.**

7.4.4.6 Pilar - Capacitación y Desarrollo

El Pilar Capacitación y Desarrollo de talentos (CyD) constituye un soporte para articular los demás procesos de la metodología TPM. Las acciones de esta etapa están dirigidas a cubrir aspectos metodológicos (formación en TPM), aspectos técnicos y de autogestión. Uno de los mayores desafíos de toda organización industrial, es contar con colaboradores competentes para llevar adelante un programa exitoso. Bajo estas circunstancias nos referimos al conjunto de ellos como *talentos humanos*[2] y no fríamente como *recursos humanos*. Uno de los factores que aporta al potencial de una persona, es su talento. La suma de voluntades bien orientadas permite alcanzar prácticamente cualquier objetivo. Un grupo de personas solidarias, talentosas, motivadas y dirigidas hacia un objetivo común, es casi invencible.

Cada función clave - puesto de trabajo - debe tener una descripción detallada de los requisitos de aptitud y actitud a satisfacer por el empleado que la ocupa. Siendo que en raras ocasiones una persona puede cubrir, de antemano, todos los requisitos de la función, el área de *Recursos Humanos* (RRHH) tendrá que impulsar planes de **completitud** cuyo fin es *llenar* los huecos funcionales del puesto.

Los planes de capacitación son una oportunidad de crecimiento. El departamento de RRHH debe medir los conocimientos y las habilidades de cada individuo utilizando matrices de habilidad. Cualquier divergencia detectada entre los requerimientos de un puesto y la oferta del talento, debe reducirse a través de planes serios de capacitación y desarrollo. La metodología TPM demanda un alto grado de polivalencia en los empleados. Mantenimiento define las necesidades de cada integrante del grupo, mientras que RRHH encuentra la solución que satisfaga tal necesidad. Lograr el crecimiento y la madurez de los colaboradores (talentos) es un compromiso compartido por los dos sectores. Es importante que la compañía cuente con un **Plan Maestro de Capacitación** (PMC) basado en las matrices de habilidad, cuyo horizonte de validez concuerde con los objetivos directivos del Master Plan TPM.

Dos son los aspectos sobre los que trabaja el Pilar CyD. El primero tiende a elevar o adecuar el **nivel técnico** a las necesidades de la organización; el segundo aspecto, y también importante, busca desarrollar la **capacidad de gestión** y autogestión.

Gestión es un término muy utilizado aunque pocas personas reparan en su importancia o significado. Gestionar no significa únicamente resolver problemas rápidamente y a medida que van ocurriendo. Una gestión eficiente encuentra el mejor camino (rápido y económico) para resolver los problemas desde la causa raíz y, lo que es más importante, hace a las soluciones perdurables en el tiempo. Un buen

1 Ver sección 7.2 "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)".

2 Acepción tomada del informe "OIM Optimización Integral de Mantenimiento" del Ing. Santiago Sotuyo Blanco de Ellmann, Sueiro & Asociados año 2001.

gerente de tema es aquel que logra implementar acciones que funcionan aún sin su presencia. A muchas personas les interesa ser imprescindibles, sin darse cuenta que ello no significa una gestión adecuada.

Delegar la ejecución pero no la responsabilidad es una condición esencial en los líderes de mantenimiento. Un buen líder no se detiene en detalles; es capaz de controlar el proceso *indirectamente* (a distancia), delegando en sus colaboradores las acciones propuestas por el Master Plan. No obstante, el intercambio de información sensible entre Jefe y Colaborador es el método más rápido para monitorear el avance de un proyecto.

La única opción para obtener beneficios de una implementación TPM, es por medio de una gestión de vanguardia para los **talentos humanos**.

Pasos del Pilar Capacitación y Desarrollo

La tabla 7.4.7 muestra los Pasos que consideramos más importantes para implementar el Pilar CyD.

PILAR: CAPACITACIÓN Y DESARROLLO		
PASO 1	Analizar la Situación Actual	- Estudiar el programa de Capacitación y Desarrollo actual. - Determinar el nivel de conocimiento y habilidad necesario para cada función (puesto de trabajo) de operación y mantenimiento. - Utilizar Matrices de Habilidad (MH). - Medir el nivel de competencias de los talentos actuales. - Cuantificar los GAP's para cada puesto de trabajo. - Redefinir la política de Capacitación y Desarrollo de la organización, con relación al Master Plan TPM.
PASO 2	Plan Maestro de Capacitación (PMC)	- Elaborar un Plan Maestro de Capacitación (PMC). - Definir metas, objetivos y prioridades. - Proponer planes de capacitación y formación en mantenimiento. - Proponer planes de capacitación y formación en operación. - Promover y estimular la polivalencia funcional. - Diseñar los planes de capacitación en etapas equilibradas.
PASO 3	Capacitación y Formación	- Implementar los planes de capacitación, utilizando: - Manuales de aprendizaje. - Instructivos de Trabajo para desarrollo en aulas. - Instructivos para el lugar de trabajo. - OPL's (lecciones de un punto) confeccionadas por el colaborador. - Estimular la práctica, el autoaprendizaje y el intercambio de opiniones. - De ser necesario, incorporar capacitación externa IN company. - De ser necesario, incorporar capacitación externa OUT company. - Medir la evolución del colaborador y reforzar debilidades.
PASO 4	Consolidar el PMC	- En función de los resultados del Paso anterior, redefinir las metas del PMC. - Elaborar un plan de carrera para las funciones principales. - Implementar evaluaciones de desempeño regulares. - Permitir y promover el autoaprendizaje en el lugar de trabajo.

Tabla 7.4.7
Resumen de los Pasos del Pilar Capacitación y Desarrollo (CyD).

Consideraciones Especiales

√ **La empresa y sus talentos**. Sin lugar a dudas, son las personas talentosas el activo principal de toda organización. Su bienestar, motivación, formación y rendimiento son factores que deben preservarse para el logro de cualquier objetivo. El departamento de Capacitación y Desarrollo, como proceso, debe atender los factores mencionados.

√ **Formación en el lugar de trabajo**. Uno de los aspectos a tener en cuenta y explotar al máximo, es la capacitación en el lugar de trabajo (training in job).

√ **Aprender enseñando**. Los especialistas experimentados son las personas que están en condiciones de transmitir conocimiento y habilidad. Además, el proceso de enseñanza motiva al instructor y eleva su nivel de conocimiento; las personas aprenden enseñando. Los conocimientos - y sobre todo las habilidades - deben incorporarse paulatinamente; es preferible incorporar una habilidad por vez. Todo proceso de aprendizaje transita cuatro etapas[1]; la tarea se transfiere cuando la persona adquiere *capacidad inconsciente*.

1 Ver sección 10.4.1, Capítulo 10.

√ **Capacitación externa**. La capacitación en el puesto de trabajo es muy importante; no obstante, nunca descuidar la posibilidad de buscar ayuda externa. La transferencia de conocimientos y habilidades entre empleados de la misma organización ocasionalmente debe enriquecerse con conocimiento externo, evitando la perpetuidad de *vicios ocultos*. Si las mejores prácticas vigentes en la empresa no alcanzan a ser las **mejores prácticas** del mercado, habrá que robustecer la formación con especialistas externos.

√ **Promover el autoaprendizaje**. Hay que facilitar la motivación del empleado para que tenga la iniciativa de aprender por sí mismo, consultando y ensayando alternativas de mejora. La práctica en ausencia de veedores o maestros instructores, sirve para fijar concepto y despojarse de compromisos de cualquier índole. El instructor debe proponer ejercicios de práctica para que el alumno se autoevalúe y aprenda de sus errores sin sentirse condicionado por la presencia de otra persona. No obstante, el autoaprendizaje debe ser bien canalizado sin caer en pruebas que puedan perjudicar su integridad física, la de terceros o provocar daños a las instalaciones o al medio ambiente.

√ **Pilar MA y Capacitación**. A través de la integración del Pilar MA y del Pilar CyD, los operarios autónomos tendrán que adquirir la capacidad de: diagnosticar fallas sintomáticas o funcionales que puedan o estén afectando la capacidad productiva del activo o la calidad de los productos, determinar las causas de tales fallas, entender el funcionamiento de las máquinas que operan, efectuar ciertas reparaciones y, fundamentalmente, identificar las situaciones de peligro del equipo y su entorno.

7.4.4.7 Pilar - Gestión de los Sectores Administrativos (Áreas Indirectas)

En mayor o menor medida toda empresa cuenta con áreas administrativas centrales como ser, finanzas, compras, abastecimiento, despacho, ventas, ingeniería, planificación, etc. Aún en el sector Mantenimiento se requiere de cierto flujo de *trabajo administrativo*. El aporte del TPM a estas funciones de soporte, es muy valorado.

El Pilar **Gestión de los Sectores Administrativos** (GSA) orienta los esfuerzos en dos sentidos. El primero apunta a mejorar la eficiencia integral de las tareas administrativas de soporte, reduciendo trabajos innecesarios, demoras, pérdidas energéticas, retrabajos, costos, etc. El segundo objetivo propicia crear ámbitos de trabajo saludables y cómodos. Los trabajadores permanecen muchas horas en sus puestos - en ocasiones más de lo necesario - por lo que debe procurarse que el lugar sea grato y genere el gusto por trabajar. La experiencia japonesa aconseja aplicar la estrategia de las **5S** para alcanzar este objetivo (Ver Anexo XI).

Resulta oportuno retomar el tema (ya mencionado) con respecto a distinguir entre *datos* e *información*. Es menester de las áreas administrativas convertirse en *fábricas de información*[1] y no únicamente en generadoras de datos. La información son datos ordenados de tal forma que permiten tomar decisiones. Los departamentos que soportan a áreas directivas y productivas, deben asegurar que exista una respuesta rápida a las demandas de información.

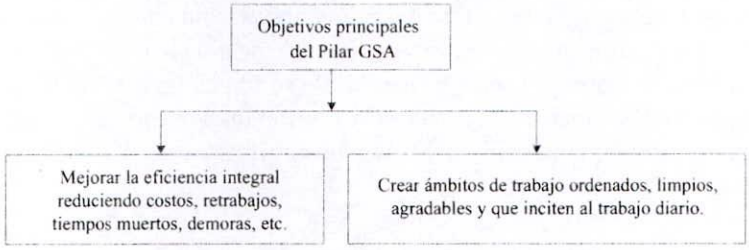


Figura 7.4.13 Objetivos principales del Pilar Gestión de los Sectores Administrativos.

1 *Del libro "TPM en Industrias de Proceso" de Tokutaro Suzuki, página 286.*

Pasos del Pilar Gestión de los Sectores Administrativos

PILAR: GESTIÓN DE LOS SECTORES ADMINISTRATIVOS		
PASO 1	Situación Actual	- Estudiar las funciones principales del Sector, considerando proveedores (output's), clientes (input's) y recursos internos.
		- Diseñar un Proceso que represente al Sector y que incluya input's, output's, recursos e indicadores de seguimiento (Eficacia / Eficiencia).
		- Dividir el Proceso en Subprocesos y establecer las funciones principales.
		- Cuantificar el tiempo y los recursos requeridos para cada Subproceso.
		- Identificar y eliminar las tareas innecesarias o los trabajos no productivos.
		- Resolver rápidamente los problemas de fácil solución.
		- Identificar los tiempo muertos y las restricciones del Proceso.
PASO 2	Plantear Objetivos y Priorizar	- Redefinir las funciones y metas del Proceso y cada Subproceso.
		- Priorizar los Subprocesos posibles de optimizar, conforme lo analizado en el Paso 1. Escoger aquellos con mayor retorno de beneficios.
		- Establecer objetivos de Eficiencia y Eficacia, medibles y alcanzables; y definir *Puntos de Control*.
PASO 3	Acciones de Mejora	- Estudiar y proponer acciones para optimizar la Eficacia y Eficiencia de las tareas administrativas.
		- Estudiar y proponer acciones para reducir los costos del sector.
		- Investigar acciones de mejora para eliminar pérdidas o problemas complejos; implementar el Pilar ME.
		- Propiciar un ámbito de trabajo saludable y agradable. Aplicar estrategia de las 5S (*Ver Anexo XI*).
		- Dotar a los talentos humanos de Polivalencia, a través de Planes de Capacitación y Desarrollo (incluye "training in job"). Apoyarse en el Pilar CyD.
		- Utilizar la Polivalencia de talentos en los picos de demanda laboral.
PASO 4	Consolidar las Mejoras	- Una vez implementada la polivalencia funcional, evaluar nuevamente la estructura administrativa (funciones y carga de trabajo).
		- Crear un ámbito de trabajo para proponer objetivos desafiantes.
		- Someter el Proceso Administrativo a la mejora continua.
		- Aplicar técnicas de resolución de problemas ante los desvíos.

Tabla 7.4.8
Resumen de los Pasos del Pilar Gestión de los Sectores Administrativos (GSA).

Consideraciones Especiales

√ **Polivalencia Administrativa**. Es muy importante contar con personal administrativo multifuncional que pueda reforzar la oferta de trabajo en momentos picos de demanda. Esta característica se presenta generalmente en áreas en las que durante cierto periodo del mes se requiere mayor fuerza de trabajo, por ejemplo, para liquidación de jornales, pago de impuestos, cierre de horas extras, informes de gastos, reportes de eficiencia o costos, etc.

√ **Tareas administrativas e indicadores**. La performance de las funciones administrativas de apoyo debe medirse con índices de resultados concretos. Algunos ejemplos son los indicadores de control de costos, stock de materiales, tiempo de entrega o recepción de un pedido, tiempo de atención a clientes (internos o externos), rendimiento operativo, orden y limpieza de oficinas, cantidad de tareas diarias, resolución de problemas, horas ocupadas por reuniones, etc. Sin embargo, no es sencillo diseñar estos indicadores ni tampoco aplicarlos y utilizarlos regularmente. Debe encontrarse un equilibrio entre el beneficio de su aplicación y el costo (esfuerzo) de su implementación. No es cuestión de agregar trabajo innecesario a las tareas administrativas ya existentes. Los índices de seguimiento deben escogerse con cautela e implementarse sólo si tienen un aporte a los resultados; de lo contrario no harían más que agregar trabajo no productivo.

7.4.4.8 Pilar - Higiene, Seguridad y Medio Ambiente

El Pilar **Higiene, Seguridad y Medio Ambiente** (HSMA) requiere la máxima atención. Se ubica ocupando el octavo lugar debido a su carácter integrador, y no por ser menos importante. A través del apoyo metodológico a los demás despliegues del TPM, tiene como objetivo principal luchar por el cero accidente y por el cuidado infatigable del medio ambiente. La meta del cero accidente se capitaliza manteniendo vivo el interés por la higiene y seguridad de las personas dentro y fuera de su puesto de trabajo.

La protección del medio ambiente se sintetiza como cero contaminación; reflejando, así, el concepto de desarrollo sustentable[1].

Para cumplir con estos objetivos es preciso un método sistemático de implementación **Paso a Paso** y un control estricto sobre las actividades, que mantengan la rigurosidad funcional del proceso. Si bien la seguridad de las personas y el cuidado del entorno son cuestiones cotidianas que deben estar presentes en toda actividad, es conveniente contar con un soporte (staff) exclusivo que apoye todas las demás áreas de la organización. Hablar de *entorno* no es referirse únicamente al medio ambiente; el entorno incluye también las instalaciones propias o de terceros que puedan verse perjudicadas por eventos catastróficos.

Los problemas de inseguridad y contaminación obedecen a dos causas. La primera son las conductas inseguras; la segunda, las fallas o mal funcionamiento del equipo. El Pilar HSMA ataca simultáneamente los dos factores. El personal, al tomar como propio el equipo, adquiere la responsabilidad sobre su propia integridad física. El compromiso por la preservación del medio ambiente se logra con fuertes programas de capacitación y formación. Muchos accidentes graves – que involucran a personas – ocurren por conductas inseguras o negligentes, como ser:

- √ Ejecución incorrecta (error de ajuste, armado, calibración, cierre de equipos, etc.).
- √ Desconocimiento de las instalaciones.
- √ Comportamiento temerario, arriesgado o inseguro.
- √ Mala planificación y coordinación de tareas.
- √ Descuido en la recepción de materiales, componentes o equipos (control de calidad).
- √ Olvidar elementos o herramientas en lugares equivocados.
- √ Diagnosticar erróneamente variables de proceso.
- √ Diagnosticar erróneamente fallas sintomáticas durante el mantenimiento predictivo.
- √ No identificar fallos ocultos durante el mantenimiento detectivo.
- √ Diagnósticos y propuestas equivocadas en los análisis de riesgos.
- √ No remover (desinstalar) elementos obsoletos o innecesarios.

El Pilar intenta transformar la costumbre de pensar en la seguridad sólo durante las auditorias, a tenerla en cuenta en todo momento y en cada actividad (operación o mantenimiento). La **Seguridad** se construye entre TODOS los que forman parte del trabajo COTIDIANO.

En lo que se refiere al mal funcionamiento de las instalaciones, existe una relación casi directa entre los accidentes y las averías. Es fácilmente demostrable que reduciendo las averías, se reduce considerablemente el riesgo de accidentes de trabajo.

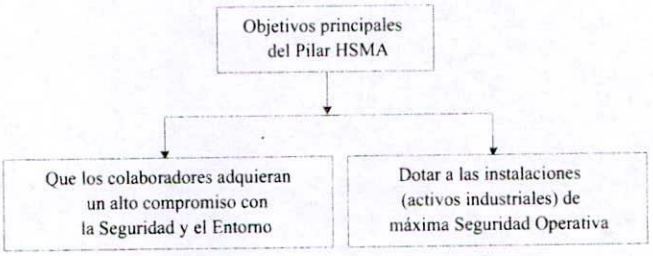


Figura 7.4.14 Objetivos principales del Pilar Higiene, Seguridad y Medio Ambiente (HSMA).

1 Una actividad es sustentable cuando mantiene a largo plazo los factores sociales, ambientales y económicos.

Pasos del Pilar Higiene, Seguridad y Medio Ambiente

La mínima cantidad de Pasos necesarios para obtener resultados favorables con el Pilar HSMA, son los siguientes:

PILAR: HIGIENE, SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE		
PASO 1	Conciencia y Educación	- Comunicar corporativa y permanentemente la importancia de la Seguridad y el cuidado del Medio Ambiente.
		- Difundir en todos los ámbitos de la organización, el concepto de "cero accidente" y "cero contaminación"; incluyendo al personal externo.
		- Promover campañas de formación en Higiene, Seguridad y Medio Ambiente.
		- Nombrar "Líderes en Seguridad y Medio Ambiente" que promuevan el Pilar HSMA.
PASO 2	Situación Actual	- Impulsar herramientas de análisis de riesgo (Ej: HAZOP).
		- Identificar las acciones inseguras realizadas por las personas.
		- Realizar mapas de seguridad (sector / instalación / equipo).
		- Identificar los dispositivos de seguridad y protección.
		- Evaluar si son suficientes los dispositivos de seguridad y protección.
		- Identificar las fuentes de peligro y contaminación (sector / instalación / equipo).
PASO 3	Acciones de Mejora	- Eliminar rápidamente los defectos que generan peligro o contaminación.
		- Crear lugares de trabajo saludables y limpios; utilizar estrategia de las 5S (Ver Anexo XI).
		- Implementar tareas de Mantenimiento Preventivo / Predictivo para los dispositivos de seguridad y protección. Realizar con el Pilar MP o MA, según despliegue.
		- Implementar tareas de búsqueda de fallos (Mantenimiento Detectivo) para los dispositivos de seguridad y protección. Realizar con el Pilar MP o MA, según despliegue.
		- Promover planes de formación para reducir errores humanos (inclusive para el personal externo), tanto en tareas de mantenimiento como de operación.
		- Implementar soluciones poka-yoke, cuando sea técnicamente factible.
		- Dotar a los dispositovos de seguridad o protección de (o mayor) seguridad inherente, cuando sea técnicamente factible.
		- Crear lugares libres de peligro y fuentes de contaminación.
		- Asegurar el uso permanente de la Gestión Visual, y eliminar la información innecesaria.
PASO 4	Control y Consolidación	- Desarrollar e implementar indicadores de eficacia y eficiencia.
		- Implementar auditorias de Seguridad y Medio Ambiente.
		- Desarrollar políticas de incentivo que alienten el compromiso con la Seguridad y el cuidado del Medio Ambiente.
		- Reconocer los logros y metas alcanzadas por el Pilar HSMA.

Tabla 7.4.9
Resumen de los Pasos del Pilar Higiene, Seguridad y Medio Ambiente (HSMA).

Auditorias de Pilar HSMA

La figura 7.4.15 muestra una planilla tipo para auditorias de Pilar HSMA. Sin embargo, cabe mencionar que es mandatorio efectuar previamente las auditorias de Paso con las sentencias correspondientes para cada uno.

Nombre de la Empresa	Auditoria de Pilar HSMA	Código	HSMA-Pilar
		Revisión	3
		Fecha	08/11/2006
		Página	1 de 1

	Higiene, Seguridad y Medio Ambiente	REFERENCIAS	
	Auditoria de Pilar: HSMA	Aprobado	≥ 85%
Sector/Equipo:	Fecha: Higiene, Seguridad y Medio Ambiente	Auditor/es:	

ASPECTOS AUDITADOS	#	DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS AUDITADOS	Malo --- Muy Bueno 0	1	2	3	4	Obs.
Conciencia	1	¿Hay evidencia que a nivel corporativo existe un criterio arraigado con respecto a la Seguridad de las personas y al cuidado del medio ambiente?						
	2	El personal involucrado, ¿conoce el concepto de "cero accidente" y "cero contaminación"?						
	3	¿Se llevan a cabo campañas de educación y formación en HSMA?						
	4	¿Existe una estructura sólida cuyos líderes asumen responsabilidades por la HSMA?						
	5	¿Participan los líderes de las reuniones y auditorias de HSMA?						
Análisis	6	¿Se han desarrollado, y están en uso, herramientas para el análisis de riesgo?						
	7	¿Se encuentran identificados todos los dispositivos redundantes y de seguridad?						
	8	¿Se encuentran identificados todos los dispositivos de protección?						
	9	¿Son suficientes los dispositivos redundantes, de seguridad y de protección?						
	10	¿Se han identificado todas las fuentes de riesgo y de contaminación?						
	11	¿Se han identificado las acciones inseguras en Operación y Mantenimiento?						
Mejoras	12	¿Existe un proceso implementado que asegura la rápida implementación de mejoras para resolver situaciones peligrosas?						
	13	¿Existe alguna metodología implementada tendiente a lograr ámbitos de trabajo seguros y saludables, como por ejemplo la estrategia de las 5S?						
	14	¿Hay rutinas Preventivas / Predictivas para los dispositivos de seguridad o de protección; están vigentes?						
	15	¿Hay tareas de búsqueda de fallos para los dispositivos de seguridad o de protección; están vigentes?						
	16	¿Existen planes de formación tendientes a reducir los errores humanos?						
	17	¿Existe vigente algún proceso cuyo fin sea aumentar la seguridad inherente de las instalaciones, por medio de mejoras o rediseños?						
	18	Los lugares de tránsito, operación, mantenimiento, etc., ¿están libres de elementos extraños, materiales y fuentes de contaminación?						
	19	¿Hay evidencia del uso de indicaciones visuales con respecto a la Seguridad?						
Control y Consolidación	20	¿Existen indicadores (KPI's) de eficacia y eficiencia para HSMA?						
	21	¿Hay evidencia que los mecanismos peligrosos están protegidos?						
	22	¿Están correctamente indicados los sitios, lugares o puntos peligrosos?						
	23	¿Están correctamente indicados los posibles puntos de contaminación?						
	24	¿Se llevan a cabo regularmente auditorias de Seguridad; son efectivas?						
	25	¿Existe un sistema de compensación o incentivos para los logros en HSMA; es eficaz?						

Observaciones:	TOTAL:	PUNTOS 0	
	Firmas del Equipo	Aprobado:	Desaprobado:

Figura 7.4.15
Formato característico para Auditorias de Pilar HSMA.

Consideraciones Especiales

√ **Pilar HSMA y Grandes Reparaciones**. Resulta fundamental la intervención del Pilar HSMA durante intervenciones mayores de mantenimiento (Parada General de Planta[1]). Durante estos eventos, generalmente existe gran cantidad de personal - de diferentes especialidades - trabajando en espacios reducidos donde, además, reina la prisa. Muchos operarios, principalmente externos (subcontratistas), desconocen las instalaciones y los peligros inherentes. Los planes de capacitación y formación, así como las campañas de difusión y control que pueda implementar el Pilar HSMA, resultan indispensables.

1 Ver Sección 8.5 "Grandes Reparaciones", Capítulo 8.

√ **Riesgo y Pilar HSMA.** El Pilar HSMA debe promover el desarrollo de análisis de riesgos, así como las actualizaciones que correspondan conforme se producen alteraciones en la instalación o en el proceso productivo. Por ejemplo, el análisis HAZOP es una herramienta interesante para identificar riesgos porque ayuda a determinar si las salvaguardas (dispositivos de seguridad o de protección) son, en cantidad y calidad, suficientes. Por su parte, el área de Mantenimiento, a través del Pilar MP, debe asegurar la funcionalidad de las salvaguardas con rutinas de mantenimiento preventivo, predictivo / proactivo o con búsqueda de fallos ocultos (mantenimiento detectivo).

√ **El trabajo diario y el Pilar HSMA**. Todas las acciones efectuadas a diario deben estar circunscriptas al ámbito del Pilar HSMA. La seguridad y el cuidado del medio ambiente no se forjan con buenas intenciones aisladas y fugaces. Los conceptos promulgados por este Pilar tienen que formar parte de la cultura organizacional.

√ **Daños graves y desvíos menores**. Es conocida y aceptada la regla que refiere que por cada siniestro grave o catastrófico ocurrido - como incendios, explosiones, grandes derrames, accidentes a personas, etc. - se están produciendo cerca de 300 pequeños incidentes o desvíos. Para evitar daños mayores, es preciso combatir los incidentes pues la concatenación de algunos de ellos podría culminar en un siniestro catastrófico. Esta hipótesis se conoce como principio de Heinrich[1].

1 Ver "Principio de Heinrich" sección 8.6.1 del Capítulo 8.

7.4.5 Relación entre Pilares

La tabla 7.4.10 ilustra las relaciones más importantes entre algunos Pilares del TPM.

Relación entre Pilares TPM	
Pilar - Pilar	**Observaciones**
MA - MP	El Pilar MA es vital para el TPM. Los miembros de equipo autónomo forman la célula de menor jerarquía en la organización; sin embargo, no es arriesgado asegurar que constituye el grupo de mayor importancia. Los objetivos trazados por el Master Plan se materializan con el accionar de los grupos de mantenimiento autónomo. Vale decir que el éxito de un programa de implementación TPM depende, aunque no exclusivamente, de los logros alcanzados por este Pilar. Igualmente ocurre con el Pilar MP, que debe capacitar y acompañar técnicamente a cada integrante del Pilar Autónomo. De lo anterior se desprende que es indispensable un trabajo coordinado entre ambos despliegues y, además, que están muy lejos de ser áreas diferentes.
MA - CyD	A través de la integración del Pilar MA y del Pilar CyD los operarios autónomos tendrán que adquirir la capacidad de: diagnosticar fallas sintomáticas o funcionales que puedan o estén afectando la capacidad productiva del activo o la calidad de los productos, determinar las causas de tales fallas, entender el funcionamiento de las máquinas que operan, efectuar ciertas reparaciones y, fundamentalmente, identificar las situaciones de peligro del equipo y su entorno.
HSMA - MA	El Pilar HSMA tiene una fuerte relación con el Pilar MA. El Paso 1 de éste último (limpieza profunda del equipo) debe llevarse adelante bajo el más estricto control de seguridad ya que los operadores no conocen aún en profundidad sus instalaciones. El Paso 2, cuando se eliminan las fuentes de contaminación, también requiere el apoyo del Pilar HSMA. En todos los casos la estrategia de las 5S (Housekeeping) resulta de gran ayuda para asegurar lugares de trabajo confortables y menos riesgosos.
HSMA - MP	El Pilar MP mantiene una constante interacción con el Pilar HSMA. Los Análisis de Causa Raíz de Falla (RCA) deberán ser impulsados por ambos despliegues. Además, muchos rediseños sugeridos por Mantenimiento Planeado, tendrán que someterse a nuevos Análisis de Riesgo (validación). En otros casos el Pilar HSMA solicitará a MP el desarrollo de sistemas del tipo poka-yoke para reducir el riesgo de falla, y por consiguiente, de accidente. Finalmente, se presenta una trilogía entre HSMA, MP y MA durante la implementación de Rutinas de Inspección Operativa Autónoma (IOA) pues el TPM propone utilizar los sentidos humanos en tales chequeos, lo que podría resultar riesgoso para los operadores. Recuérdese que para ciertas variables como, por ejemplo, la temperatura, es preferible utilizar elementos de medición a distancia (Ej: pirómetros ópticos) en lugar del tacto.
GSA - MA	El Pilar GSA puede incorporar mucha experiencia de los equipos de mantenimiento autónomo. Los empleados del sector administrativo deben cuidar su material de trabajo y mantener limpio y libre de elementos extraños los lugares de trabajo.
GSA - ME	Dentro de las herramientas útiles para resolver problemas serios de gestión administrativa, se encuentra el Pilar Mejora Enfocada. Algunos problemas complejos pueden resolverse formando grupos especiales que se sustentan en técnicas de mejora PHVA para plantear soluciones.

Tabla 7.4.10
Relación entre Pilares.

7.4.6 Consolidación del TPM

Algunos autores llaman a esta etapa fase de *perpetuidad*[1]. La consolidación de los logros alcanzados por la metodología garantiza el éxito a largo plazo. Todo plan se establece para un horizonte de validez; no obstante, es posible que algunos objetivos se alcancen antes de cumplirse tal periodo. Lo más difícil no es llegar a la meta, sino mantener los valores en el tiempo. El Master Plan TPM planea cada despliegue para obtener los máximos beneficios a lo largo del horizonte de validez.

Algunas implementaciones han considerado que la etapa de consolidación consiste en avanzar horizontalmente con los despliegues; esto es, extender y replicar las buenas prácticas en forma lateral hasta cubrir todos los activos de planta.

7.4.7 Pérdidas y Productividad Total de Equipo

El TPM identifica inicialmente 8 tipos principales de pérdidas que impiden mejorar la efectividad de los equipos, sistemas productivos, sectores o plantas industriales. Una breve descripción de cada una de estas pérdidas aparece en la tabla 7.4.11.

---

1 Leandro Daniel Torres, "Mantenimiento - Su Implementación y Gestión", página 208. Universitas.

Las 8 Pérdidas Principales	
Pérdida por	**Observaciones**
1- Paradas Programadas	La metodología TPM considera que toda Parada Programada para Mantenimiento constituye, de por si, una pérdida; motivo por el cual si se reducen las Paradas se minimizan las pérdidas. Esto es válido para ciertas situación de demanda insatisfecha, sobre todo cuando se consideran Grandes Reparaciones en la que todas las instalaciones quedan desafectadas de la producción (Ej: Parada Anual de Planta). Detrás del concepto "Pérdida por Parada Programa" se esconde la intención razonable de sustituir el Mantenimiento Preventivo Periódico (MPP) con detención de marcha, por tareas de mantenimiento que eviten o reduzcan las detenciones (Ej: Mantenimiento Basado en Condición / Chequeos de Recorrida / Búsqueda de Fallos Ocultos / Inspecciones Dinámicas / etc.). Entran dentro de esta categoría las pausas de producción para que los operadores de máquina acudan a reuniones de cualquier tipo.
2- Ajustes de Producción	Cuando hay fluctuaciones en la demanda de un producto (no contempladas en el Plan de Producción) o problemas en la recepción de materias primas, es posible que sea necesario ajustar el Plan de Producción. Estos ajustes por lo general provocan pérdidas. La disminución de la demanda aumentará la existencia de stock inmovilizado del producto terminado (producto sin vender), bajarán las ventas y, además, si la demanda solicita otro producto, probablemente haya que comprar materias primas (con poca negociación) no contempladas en el Plan original. Pueden reducirse estas pérdidas con mejoras en la planificación de la producción y con un seguimiento estricto de los factores de mercado.
3- Falla de equipos	Este tipo de pérdidas son evidentes y están muy relacionadas al mantenimiento. Se producen cuando los activos dejan de cumplir sus funciones (principales o secundarias) a causa de fallas o averías. El equipo puede fallar y detenerse completamente (**pérdidas directas**), o bien disminuir el régimen de marcha, contaminar el producto en tránsito, perder materia prima, etc. (**pérdidas indirectas**).
4- Falla de procesos	Son fáciles de identificar y corresponden a ineficiencias, errores o desajustes en los procesos operativos. También aparecen pérdidas de este tipo cuando algún factor externo altera las condiciones de calidad de las materias primas. El deterioro forzado de las instalaciones, por falta de limpieza por ejemplo, favorece las fallas de proceso. Operación y Mantenimiento pueden reducir drásticamente las pérdidas por fallas de proceso.
5- Producción Normal	También llamadas pérdidas por **régimen transitorio**, reducen el rendimiento de los equipo durante la puesta en marcha o la detención. Suele considerarse "normal" que todo equipo tenga un tiempo de puesta en marcha hasta alcanzar el régimen nominal de producción (cantidad y calidad). Que tal situación sea cierta, no significa que no pueda mejorarse; cualquier reducción en el tiempo que el equipo tarda en llegar al régimen nominal, aumenta su eficiencia. Es más notoria esta situación luego de grandes reparaciones por mantenimiento o después de calibrar la máquina para un nuevo producto. La reducción de los tiempos de "puesta en marcha" (hasta **régimen nominal**), son un desafío de las grandes industrias. Estas pérdidas se reducen mejorando los sistemas de cambio de moldes, matrices, calibres, formatos, etc. así como los procedimientos de arranque o detención de marcha.
6- Producción Anormal	Las pérdidas de producción denominadas "**anormales**" obedecen a situaciones de bajo rendimiento durante el **régimen nominal**. Cuando la tasa de rendimiento productivo (volumen de producción / unidad de tiempo) está por debajo de los valores declarados como posibles en la máquina, se presenta la situación de producción anormal. Todos los involucrados en el proceso productivo deben trabajar para que los equipos produzcan el mayor tiempo posible al nivel nominal.
7- Defectos de Calidad	Son pérdidas originadas por los productos fabricados fuera de las especificaciones de calidad establecidas por la organización. Los gastos operativos para fabricar nuevamente todo el producto "mal fabricado", forman parte de este tipo de pérdidas. Además, si el producto no-conforme (intermedio o final) no puede ser aprovechado o reprocesado, habrá que disponer recursos para su tratamiento o disposición final. Se pueden minimizar estos defectos eliminando los modos de falla que afectan calidad, haciendo correcciones en los equipos (rediseños), evitando errores en los procesos de operación, mejorando los lugares de almacenaje de producto intermedio, etc.
8- Reproceso de Material o Retrabajo	Finalmente aparecen las pérdidas debidas a la necesidad de reprocesar material no conforme. Para el caso que el producto (intermedio o final) pueda y deba ser reciclado, los gastos operativos asociados a tal reproceso constituyen una pérdida por retrabajo. Muchas empresas destinan gran cantidad de recursos al reprocesamiento de material fuera de especificación. Caben las mismas recomendaciones para minimizar los retrabajos que en la pérdida anterior.

Tabla 7.4.11
Las 8 pérdidas principales que identifica el TPM.

Actualmente algunas versiones del TPM identifican hasta 16 pérdidas; sin embargo, las aquí consideradas agrupan todas las posibles falencias de un sistema productivo.

Una vez establecidas las pérdidas, es preciso encontrar la forma de medir su impacto.

7.4.7.1 Productividad Total de Equipo (PTE)

Se analiza en esta sección la manera de calcular la productividad de un equipo, línea, sistema productivo o planta industrial, desde un punto de vista integral. La **Productividad Total de Equipo** (PTE), también llamada **Efectividad Total de Equipo**, cuantifica simultáneamente todas las posibles deficiencias. Los criterios para medir el "tiempo productivo"[1] y los indicadores aplicados en cada caso, pueden utilizarse aún sin haber implementado un modelo TPM. Muchas organizaciones poseen indicadores de performance, rendimiento, disponibilidad, eficiencia, etc., similares a los aquí descriptos y, sin embargo, no aplican TPM como metodología de gestión.

La Productividad Total de una unidad productiva se ve afectada por dos factores principales. Por un lado el **Grado de Utilización** de los activos (GU), y por el otro, la eficacia con que el proceso de fabricación se cumple. Este último factor se denomina **Eficacia Global de Equipo** (EGE). Vemos a continuación el impacto de cada pérdida en los dos factores.

Disponibilidad

Del Capítulo 1 (ecuación 1.2.40) se sabe que la *Disponibilidad Operacional* (D_O) de un equipo puede determinarse como se reescribe en la ecuación 7.4.1.

$$D_O = \frac{(T_{DO} - T_{TPNP})}{T_{DO}} \qquad (7.4.1)$$

Donde T_{DO} es el tiempo disponible (planificado) para operar y, T_{TPNP}, el tiempo por paradas no programadas (inherentes o no al equipo) debidas a fallas o averías que causan la detención de marcha. En T_{TPNP} se tienen en cuenta la 3° y 4° pérdida de la tabla 7.4.11. Ver figura 7.4.16.

Rendimiento

Las pérdidas ocurridas por producción normal y/o anormal (5° y 6°) se reflejan con un indicador llamado *rendimiento*. El rendimiento (R) mide las pérdidas ocurridas por funcionar a un régimen de marcha inferior al nominal pautado para el equipo. Este valor se conoce como capacidad nominal (C_N), también capacidad deseada, y es la cantidad de producto que teóricamente puede fabricarse por unidad de tiempo. C_N constituye una condición de diseño comprobada y aceptada por la organización. Un rendimiento menor al esperado constituye una pérdida. Las pérdidas de este tipo pueden suceder porque existen retardos para alcanzar C_N después de un arranque (5° pérdida), o bien porque durante el régimen normal la máquina opera por debajo de C_N (6° pérdida)

Si C_{PO} es la cantidad real producida en el tiempo de operación T_O, se define el rendimiento según muestra la ecuación 7.4.2.

$$R = \frac{C_{PO}}{T_O . C_N} \qquad (7.4.2)$$

Nótese que R es adimensional dado que C_N es la cantidad de producto elaborado por unidad de tiempo. En el mejor de los casos, $C_{PO} / T_O = C_N$ y el rendimiento es 100%. La ecuación 7.4.3 es otra manera de calcular el rendimiento como función del tiempo neto de operación T_{NO} y del tiempo perdido por marchar a menor velocidad T_{MVO}. Ver figura 7.4.16.

En rigor, T_{MVO} es una abstracción (la máquina funcionó por T_O), pero se lo considera como el tiempo de menos que habría funcionado una máquina cuya capacidad es C_N.

1Ver Anexo X "Análisis de Tiempos Productivos".

$$R = \frac{T_{NO}}{T_{NO} + T_{MVO}} \tag{7.4.3}$$

Índice de Calidad

La 7° y 8° pérdida se ponen de manifiesto a través de la ecuación 7.4.4 en la que el *índice de calidad* (I_C) depende de la capacidad del sistema para elaborar productos de buena calidad.

$$I_C = \frac{T_{EP}}{T_{EP} + T_R} \tag{7.4.4}$$

T_R es el tiempo insumido para fabricar los productos que fueron rechazados o reprocesados por estar fuera de especificación; a su vez, T_{EP} es el tiempo efectivo de producción. La suma de ambos es, como se vio, el tiempo neto de operación (T_{NO}). Ver figura 7.4.16.

Una manera alternativa de calcular I_C es a través del volumen producido (Vp) y aceptado como conforme según las especificaciones de calidad (ecuación 7.4.5).

$$I_C = \frac{V_{p\ ACEPTADO}}{V_{p\ ACEPTADO} + V_{p\ RECHAZADO} + V_{p\ REPROCESADO}} \tag{7.4.5}$$

El producto de los tres términos anteriores es la Eficacia Global de Equipo (EGE).

$$EGE = D_O . R . I_c \tag{7.4.6}$$

El EGE es un indicador integral de **eficacia** válido para el tiempo de funcionamiento. Resulta útil para evaluar la eficacia del mantenimiento. Si las tareas de mantenimiento son efectivas, no deberían existir grandes pérdidas por calidad ni por bajo rendimiento operativo. De la misma forma, las detenciones no programadas tendrían que ser mínimas. Sin embargo, este índice no contempla la **eficiencia** de la gestión. Si las paradas programadas para mantenimiento preventivo, por decir, son exageradas (se hace más de lo necesario), nunca quedarán reflejadas. De la misma forma ocurre con el tiempo destinado a las reuniones con los miembros de equipo TPM que caen fuera del T_{DO}.

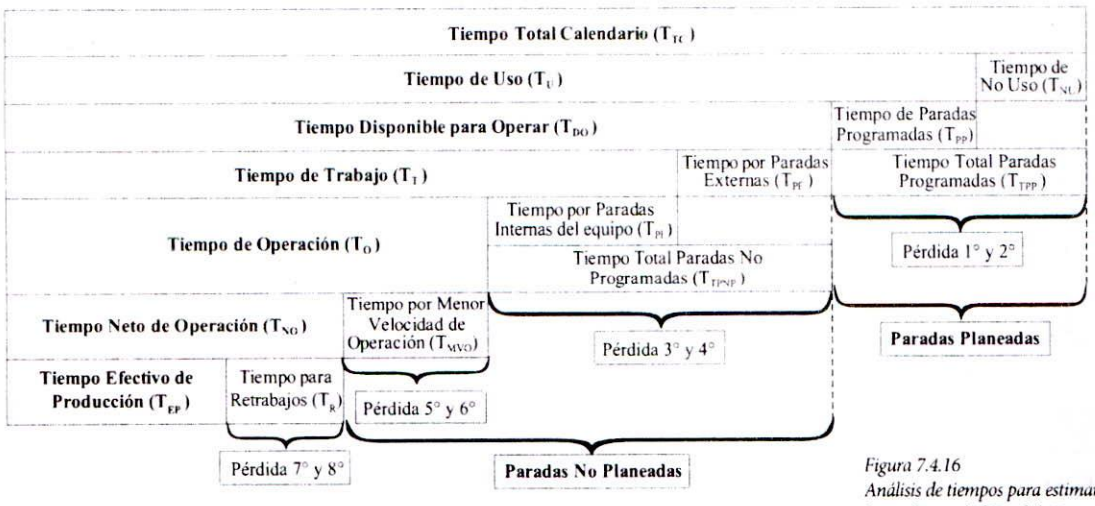


Figura 7.4.16
Análisis de tiempos para estimar la Productividad Total de Equipo (PTE). Ver Anexo X.

El segundo factor es el **Grado de Utilización** (GU) e incluye la 1° y 2° pérdida. Pueden caer dentro del intervalo (T_{TPP}), el tiempo destinado a paradas programadas para mantenimiento, reuniones, descansos, refrigerios, cambios de turno, etc., como el tiempo asumido de no uso para los activos productivos.

Algunas compañías padecen gran estacionalidad en la demanda de sus productos, por lo que establecen mucho tiempo de no uso. El desafío que propone el TPM es achicar (con el apoyo de la alta Dirección Gerencial) este tiempo, con fuertes campañas de promoción que aumenten la demanda, o elaborando productos alternativos cuya demanda sea *cruzada* con respecto al producto principal. La meta es saturar el tiempo total calendario (T_{TC}), reduciendo las paradas programadas o aprovechando cada vez más la capacidad productiva.

Como se anticipó, Mantenimiento tiene mucho para ofrecer con respecto a la reducción de las Paradas Programadas. Debe intentar sustituir el mantenimiento preventivo periódico (MPP) por acciones más pro-activas que eviten la necesidad de detener la marcha.

$$GU = \frac{T_{DO}}{T_{TC}} \tag{7.4.7}$$

Donde según muestra la figura 7.4.16, el tiempo disponible para operar (T_{DO}) es:

$$T_{DO} = T_{TC} - T_{TPP} = T_{TC} - (T_{NU} + T_{PP}) \tag{7.4.8}$$

Finalmente, queda establecida la Productividad Total de Equipo (PTE) como el producto entre el Grado de Utilización (GU) y la Eficacia Global de Equipo (EGE)[1].

$$PTE = GU \cdot EGE \tag{7.4.9}$$

7.4.7.2 Indicadores Complementarios

De acuerdo a la necesidad de cada organización es común encontrar otros indicadores como los referidos a continuación.

Eficiencia

La eficiencia (E_{FI}), tomada aquí como un indicador parcial, muestra la proporcionalidad entre el tiempo dedicado a paradas programadas (mantenimiento, ajustes, reuniones, cambio de turno, etc.) y el tiempo disponible para operar.

$$E_{FI} = \frac{T_{DO}}{T_U} \tag{7.4.10}$$

Performance

Muestra la capacidad total inherente de la unidad; no se tienen en cuenta las paradas externas. También se conoce como *performance neta*.

$$P = \frac{T_{EP}}{T_T} \tag{7.4.11}$$

Donde $T_T = T_{DO} - T_{PE}$

OEE (Overall Equipment Effectiveness)

La Eficiencia Global de Equipo (OEE) es un indicador integral de **eficiencia**. El cálculo es similar al de la Eficacia Global de Equipo (EGE), sólo que la Disponibilidad (D'_o) tiene en cuenta el tiempo de paradas programas (T_{PP}).

$$D'_o = \frac{(T_U - T_{PP} - T_{TPNP})}{T_U} \tag{7.4.12}$$

---

1 Ver Ejemplo 1 en el Anexo X "Análisis de Tiempos Productivos".

$$OEE = D'_O . R . I_c \quad (7.4.13)$$

Aunque el OEE tiene en cuenta las paradas programadas, es un índice que no considera el impacto del tiempo de no uso (T_{NU}). Para ello es necesario estimar la Productividad Total de Equipo (PTE).

NOTA: El Capítulo 12 en la sección 12.3 presenta un paquete de indicadores para la gestión integral de mantenimiento.

7.4.7.3 Importancia y Precauciones

El indicador de eficacia global de equipo (EGE) nos permite evaluar integralmente el impacto en el negocio de los tres factores vistos con anterioridad: *disponibilidad, rendimiento* y *calidad*. La magnitud de cada uno deja en evidencia el área con mayor debilidad. Como es de sospechar, las acciones de Mantenimiento influyen, en mayor o menor grado, en cada uno de estos factores. Las fallas que provocan detenciones (averías) afectarán la disponibilidad (D_O), mientras que el resto probablemente disminuyan el rendimiento (R) y/o el índice de calidad (I_C).

Algunas unidades productivas con bajo EGE ofrecen grandes oportunidades de mejora. Las acciones del Pilar MA y MP, si son eficaces, mejoran sustancialmente el EGE.

El OEE, por su parte, permite cuantificar el impacto de las paradas programadas sobre la productividad de los activos. Una tentación es reducir el tiempo destinado a las paradas para mantenimientos programado (T_{pp}) con el fin de mejorar D'_O (ver ecuación 7.4.12). Sin embargo, si tal reducción es indiscriminada, aumentarán las fallas imprevistas con la consiguiente merma en disponibilidad. Una reducción violenta y no controlada de las rutinas de mantenimiento, si bien reduce el T_{pp}, también puede aumentar - y en mayor proporción - el T_{TPNP}. Por el contrario, si la reducción del tiempo para mantenimiento se debe a un estudio serio de los modos de falla, por ejemplo a través de RCM, o bien a un aumento de la eficiencia en la ejecución de cada tarea, entonces podrá disminuir el T_{pp} sin afectar la disponibilidad.

El EGE y el OEE se usan también como criterio para priorizar los proyectos del Pilar Mejora Enfocada (ME) y decidir en qué equipos (o áreas) es más conveniente comenzar el trabajo. Sin embargo, hay situaciones en las que tomar decisiones únicamente en función del EGE puede resultar peligroso. Este indicador nada dice a cerca de las pérdidas o beneficios económicos que sufre la organización, cuando el mismo baja o sube respectivamente; le asigna el mismo peso relativo a los tres factores de la ecuación 7.4.6.

Si se tienen dos equipos idénticos y uno de ellos posee un menor EGE, no necesariamente significa que provoque mayor pérdida económica que aquel con mayor EGE. Puede ocurrir que la estructura de gastos (costos) haga que las pérdidas económicas sean mayores aún en el equipo con EGE superior[1]. Por tal motivo, usar el EGE para hacer benchmarking[2] posiblemente conduzca a errores de apreciación.

La forma más segura de usar el indicador, es haciendo sólo comparaciones sobre la propia unidad - y teniendo en cuenta cada factor por separado -, o relacionando los resultados con metas de referencia ideales; pero nunca entre unidades productivas aún similares.

Una alternativa es cuantificar económicamente cada "*punto*" de EGE asociado a cada factor y en cada proceso. Se valoriza, entonces, la pérdida económica que le provoca a la compañía cada unidad porcentual de EGE. Pero, sin dudas, este cálculo es bastante más dificultoso.

7.4.8 Ventajas y Desventajas del TPM

Las ventajas y desventajas más importantes del sistema TPM se listan a continuación.

7.4.8.1 Ventajas

√ El TPM es una metodología de gestión integradora; las decisiones tomadas por el equipo directivo terminan implementándose a nivel de la operación. Las acciones se coordinan entre la alta Gerencia y el "piso de planta".

---

1 Ver Ejemplo 2 en el Anexo X "Análisis de Tiempos Productivos".
2 Ver sección 7.5.2 "El Benchmarking".

√ Permite administrar la información para difundir el conocimiento transversalmente. Utiliza y capitaliza la experiencia del personal mejorando competencias y habilidades; se enriquecen todos los miembros del grupo.

√ Promueve el autoaprendizaje, la comunicación, el crecimiento personal, la delegación y la motivación.

√ Desarrolla buenas prácticas y su perspectiva es replicarlas en procesos similares.

√ Reduce el riesgo de accidente, mejora la higiene en el puesto de trabajo y reduce el consumo de energía y el impacto ambiental.

√ A través del progreso de las personas (trabajando aspectos personales) se reducen los errores humanos (*modos de falla humanos*) y se minimizan las pérdidas asociadas.

√ Aumenta la Disponibilidad de Planta y se reducen los Gastos Operativos.

√ Se fomenta la cultura del trabajo en equipo y el sentido de pertenencia, en lugar del individualismo. Cada miembro de la organización conoce el beneficio que le aporta su trabajo a la compañía. Es reconfortante para las personas saber porqué y en qué medida es importante su trabajo dentro del grupo.

√ Mejora la eficacia, eficiencia y efectividad de los procesos de operación.

√ Se reduce el plazo de entrega de productos intermedios o finales, elevando la velocidad real de la máquina a la prestación deseada (velocidad nominal).

√ Se descentraliza parcialmente el Mantenimiento reduciendo la cantidad de OT a ejecutar por los especialistas de mantenimiento. Las fallas de baja complejidad son resueltas por el propio personal operativo. Bajan los gastos y los trámites administrativos.

√ El diagnóstico de falla es más rápido y preciso. Los operadores de producción se convierten en inspectores permanentes de los equipos.

7.4.8.2 Desventajas

√ Una errónea interpretación metodológica - por parte de los responsables del Master Plan - puede demorar la eliminación de fallas que afectan la Seguridad o el Medio Ambiente.

√ El TPM gestiona aspectos de la conducta humana. Las culturas y las leyes laborales son distintas según los países y suelen presentarse conflictos gremiales a las puertas de los despliegues. El "Manejo del Cambio" trae, en ocasiones, excesiva fricción que desgasta la relación interpersonal. Las personas se forman culturalmente a lo largo de muchos años, por lo que un cambio cultural demora largo tiempo, esfuerzo y paciencia.

√ Siendo que el mayor desarrollo de la metodología se logró en Industrias de Manufactura, la aplicación en Industrias de Proceso encuentra ciertas limitaciones que deben salvarse con adecuados programas de implementación y desarrollo[1].

√ En principio, es necesario demasiado tiempo y personal para ejecutar las tareas propuestas por cada Pilar. Se produce un incremento inicial de los gastos operativos.

---

1 En Industrias de Proceso el control de las operaciones productivas es más descentralizado y con menor contacto de las personas con la máquina. Ver "TPM in Process Industries" de Takutaro Suzuki y otros autores (JIPM).

√ Las implementaciones son a mediano / largo plazo, razón por la cual una alta rotación del personal puede demorar el avance.

√ Algunos despliegues requieren de mucho tiempo antes de obtener beneficios concretos. Lo sistemático del proceso obliga, en ciertos casos, a esperar que se consoliden los Pasos finales.

√ La experiencia demuestra que las técnicas de mantenimiento basadas en condición, son mejoradas tardíamente (Paso 5 del Pilar MP). Si bien se hace fuerte hincapié en el control de estado a través de los sentidos humanos (IOA), podrán existir modos de falla que lamentablemente no pueden detectarse sino con instrumentos y técnicas avanzadas.

√ Hay una tendencia inicial, aparentemente excesiva, a aplicar Mantenimiento Preventivo.

√ La motivación y compromiso del personal es clave para el éxito de un programa TPM. La metodología por sí sola no genera, al menos inicialmente, tal motivación. Es un desafío para toda organización encontrar el "cómo" llegar a niveles de compromiso adecuados pues se trata de una restricción compleja. El proceso demanda, desde el inicio, apoyo de todos los colaboradores. Si bien el marco teórico del método sugiere algunas posibles maneras de incentivar a los involucrados, es evidente que cada empresa debe transitar su propia experiencia. El mayor desafío de la organización - y sus líderes - es encontrar los caminos que conduzcan al cambio cultural. La dedicación y el compromiso del personal, en los tiempos que corren, no es tarea fácil; requiere de mucha creatividad e imaginación. Téngase en cuenta que la conducta de las personas es lo que más impulsa o retrasa cualquier proyecto y, el TPM, no escapa a esta regla.

√ El TPM establece claramente en todos sus procesos, qué debe hacerse para obtener los máximos beneficios en productividad. Sin embargo, y principalmente en el Pilar MP, son necesarias otras técnicas para definir el "cómo" lograrlo.

El TPM está completamente vigente. Las empresas que lo aplican buscan la mejor forma de concretar sus expectativas. El TPM evolucionará a lo largo del tiempo incorporando técnicas y métodos de apoyo que le permitirán optimizar su eficacia. El sistema puede enriquecerse con el aporte de toda nueva estrategia de gestión y mantenimiento.

7.4.9 Aplicación simultánea e integrada de TPM y RCM

Siendo que hemos visto ambas metodologías detalladamente, nos permitimos hacer algunos comentarios acerca de la posibilidad (y necesidad) de aplicarlas simultáneamente.

La combinación de estos dos sistemas mejora sin lugar a dudas la eficacia de cualquier programa de mantenimiento industrial. Por un lado el TPM "pavimenta" el camino administrativo y promueve el cambio cultural y organizacional necesario, y sienta las bases para una gestión sistemática de las prácticas; por el otro, el RCM ofrece fundamentos técnicos sólidos para encontrar las tareas más efectivas y eficientes para cada equipo y, lo que es muy importante, evita hacer tareas innecesarias. Con RCM se obtiene incluso la estrategia de mantenimiento para los planes autónomos, las capacitaciones necesarias para el personal técnico, la evidencia de que es necesario un rediseño en el activo, etc. El RCM aporta rigurosidad científica y económica en la creación de las rutinas de mantenimiento que implementa el TPM.

El TPM asigna un alto valor al trabajo en equipo y a los conceptos de mejora permanente. Esto muchas veces es una barrera para implantar TPM fuera de Japón (ver figura 7.4.4). En occidente los comportamientos son más impulsivos e individualistas. Se percibe mayor ansiedad para el logro de objetivos con lo que las personas tienden a escoger los caminos *más cortos* aunque, muchas veces, terminan siendo los más largos. Sin embargo, las mismas causas que harían presumir las dificultades de implementar TPM, deben ser la fuente de motivación para generar los cambios. Desde este enfoque, son tantas las potenciales oportunidades que cualquier mejora - por menor que sea - genera un gran aporte a la organización.

Los resultados que se pueden esperar de combinar TPM con RCM son muy estimulantes.

√ Mientras TPM es un proceso gerencial integrador; RCM es un proceso estructurado de decisión que propone la mejor *táctica* para satisfacer la *estrategia* planeada por TPM.

√ Relacionar el Pilar MP con el RCM es imprescindible. No hay forma de evitar la recurrencia de las fallas ni minimizar su impacto, si no se aplican tareas costo-eficaces.

√ El TPM tiene una gran propensión a prevenir las fallas por mortalidad infantil. El RCM nos enseña que gran parte de las averías se manifiestan, justamente, durante los primeros momentos de una puesta en marcha. Si la Condición Básica del activo es garantizada, y los procedimientos de operación y mantenimiento se optimizan, entonces "la mitad de la batalla está ganada".

√ Es sumamente importante que el personal capacitado en TPM también lo esté en RCM. Esto esclarece el conocimiento sobre el concepto de modo de falla y sus efectos, y la persona podrá discernir entre causa y consecuencia de los fallos. El trabajo diario de producción se verá altamente mejorado porque los operadores entenderán los procesos de falla.

√ Muchos modos de falla, identificados por RCM, están asociados a errores humanos (tanto de operación como de mantenimiento). El TPM puede hacer un gran aporte promoviendo planes de capacitación y desarrollo a través del Pilar correspondiente (sección 7.4.4.6).

√ La delegación de la lubricación en áreas operativas (Mantenimiento Autónomo) debe apoyarse en sólidos planes de capacitación. Los inconvenientes que puede causar una lubricación insuficiente o inapropiada, son minuciosamente analizados por RCM. El RCM estudia estos patrones de falla y pone en conocimiento a los usuarios de la máquina sobre su importancia.

√ Los estándares de inspección operativa (IOA) dan mejores resultados si se desarrollan por medio del RCM. Pueden obtenerse las listas de tareas, las frecuencias de ejecución y los responsables más idóneos para cada caso. Impulsar las mejoras de las IOA con el aporte del RCM, es verdaderamente provechoso. De la misma forma, a la hora de crear u optimizar los estándares de limpieza y lubricación o las rutinas de inspección dinámicas o estáticas (RIE / RID).

7.5 Herramientas de Mejora

Esta sección pretende describir brevemente otras dos herramientas potencialmente aplicables en la Gestión de Mantenimiento.

7.5.1 Metodología Six SIGMA

Desde mediados de la década de los 80' se está implementando en algunas organizaciones una metodología de mejora basada en la estadística y denominada Six Sigma (6σ).

Al igual que para cualquier otro proceso es preciso contar con una profunda compresión y con el consecuente compromiso de la más alta dirección de la organización. Sin su apoyo permanente, y sin un interés por los resultados, cualquier proyecto Six Sigma desvanece.

7.5.1.1 Objetivo y Aspectos de un Proyecto Six Sigma

Escogido un proceso, el objetivo es mejorarlo hasta lograr un nivel o valores de optimización factibles, o bien rediseñarlo completamente. Todo plan de mejora se concibe como un proyecto específico. A cada proyecto se le asigna un dueño (responsable) quien responderá y estará comprometido con su éxito. Es fundamental que el dueño del proyecto identifique al dueño del proceso (process owner) de manera que pueda entender sus necesidades, inquietudes y posibilidades; lo que significa contar con la "voz del cliente". Un aspecto diferenciador de esta metodología es que procura que la organización trabaje sobre proyectos en cuyos resultados alguien está muy interesado/a.

De manera muy ordenada, se satisfacen secuencialmente diferentes pasos, que a su vez, utilizan otras conocidas herramientas auxiliares: diagramas de flujo para comprender la relación entre las etapas del proceso, diagramas Causa - Efecto (espina de pez), el principio de Pareto, los Análisis Causa - Raíz de Falla (RCA) y otras ayudas estadísticas menos difundidas.

La tercera característica diferencial e importante del método, es la rigurosidad estadística que posee. Si bien esto inicialmente podría parecer engorroso, hoy en día está bien resuelto con soluciones informáticas que, con ingresar algunos datos, realizan los cálculos automáticamente. Programas como el Minitab® son de uso frecuente en Ingeniería de Mantenimiento para esta clase de proyectos. La base de datos, y su tratamiento estadístico avanzado, garantizan que se puedan entender mejor los puntos débiles de los procesos y se puedan identificar causas y soluciones que produzcan mejoras significativas.

Se toman entonces, variables de entrada y de salida, y se busca la mayor cantidad de datos para cada una. Analizadas y estudiadas dichas variables (según la relación causa – efecto), se proponen mejoras y se implementan por medio de una prueba piloto en un universo reducido del proceso a mejorar. Si el resultado de la propuesta es el esperado, se replica el aprendizaje en el resto del universo escogido para su optimización. Es importante garantizar todos los pasos que sugiere el método sin omitir ni alterar ninguno.

La metodología llama *Sigma* al número de defectos por millón de oportunidades.

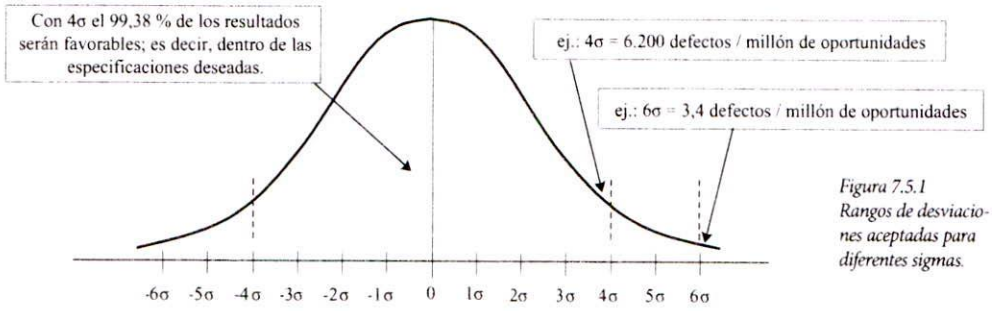


Figura 7.5.1
Rangos de desviaciones aceptadas para diferentes sigmas.

Por ejemplo, un proceso Sigma4 significa que el 99,38% de los resultados estarán dentro de los valores establecidos como *buenos* (figura 7.5.1).

Supóngase que la gestión del Almacén de Repuestos desea controlar y mejorar el proceso de aprovisionamiento de cierto repuesto muy costoso y necesario para un determinado equipo. La variable a mejorar es la precisión en el tiempo de entrega; es decir, minimizar la variación del plazo de entrega (PE). El objetivo es que PE sea de 30 +/- 1 día; no es importante reducirlo, sino asegurar una mínima variabilidad. Ingeniería de Mantenimiento asegura que si el plazo de entrega supera por mucho los 30 días, se corre el riesgo de afectar la entrega de producto terminado al principal cliente de la compañía; por el contrario, si el repuesto está mucho tiempo antes en la Planta, los costos de inmovilización y almacenaje resultan demasiado elevados.

Si fuese posible lograr un aprovisionamiento estable tal que sólo el 6,68% de las entregas se hagan antes de 29 o después de 31 días, se estaría en presencia de un proceso Sigma3; vale decir que, solamente 66.800 entregas de un millón posible, quedarían fuera de la especificación (93,32%). Ver figura 7.5.2.

Si Mantenimiento desea alcanzar un estado Sigma4 para el proceso de aprovisionamiento de este repuesto (99,38% de resultados favorables), deberá instrumentar acciones de mejora tendientes a lograr que sólo 6.200 entregas de un millón posible, se hagan fuera del rango de tiempo establecido como aceptable (30 +/- 1 día).

Sigma (σ)	0,5	1	1,5	2	2,5	3
dpmo	841300	691500	500000	308500	158700	66800
Resultados favorables [%]	15,87%	30,85%	50,00%	69,15%	84,13%	93,32%
Sigma (σ)	3,5	4	4,5	5	5,5	6
dpmo	22700	6200	1300	230	30	3,4
Resultados favorables [%]	97,73%	99,38%	99,87%	99,98%	99,997%	99,99966%

***dpmo**: defectos por millón de oportunidades.*

Figura 7.5.2
Valores orientativos de resultados posibles en Six Sigma.

Otro ejemplo característico en Mantenimiento, es la reparación y puesta en servicio de los equipos de Planta. Un proyecto de mejora podría orientarse a reducir, a cierto valor convenido, el tiempo de reparación de algún tipo de activo (ej: bombas centrífugas marca X, modelo Y).

Puede observarse que el campo de acción para la metodología Six Sigma en Mantenimiento es casi inagotable. Es factible reducir gastos, pero también fallas, siempre que los modos de falla sean claramente identificados y exista la abundancia de datos necesaria.

7.5.1.2 Estructura para un proyecto Six Sigma

Lo usual es establecer una estructura compuesta por *Green Belts* (cinturones verdes), *Black Belts* (cinturones negros), *Master Black Belts* (cinturones negros expertos), *Project Champions* (campeones de proyectos) y *Deployment Director* (director desplegador).

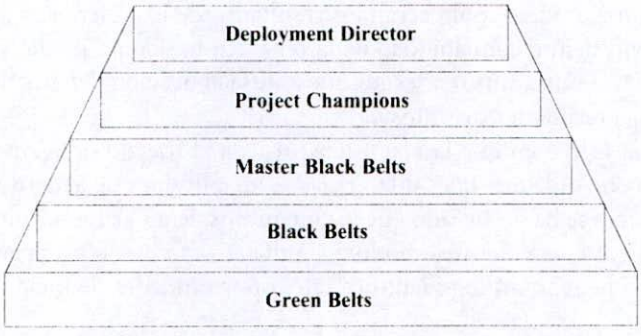


Figura 7.5.3
Estructura funcional típica para proyectos Six sigma.

Como se insinuó al inicio, el máximo escalafón de una estructura Six Sigma estará liderado por un Director, quien será el encargado de promocionar, apoyar e incentivar el desarrollo de la metodología a nivel corporativo. En segundo lugar aparecen los dueños de proyectos críticos (Project Champions) quienes, junto a los Master Black Belts, lideran y apoyan técnicamente a los Black Belts. A su vez, cada Black Belt lidera un grupo de mejora formado por Green Belts. Estos últimos, son los miembros del grupo y los directamente involucrados en la mejora del proceso.

7.5.1.3 Conclusiones y Recomendaciones

El Six Sigma encuentra en la gestión de activos un campo de aplicación bastante extenso. Con buen nivel de capacitación, es fácil de aplicar. Los resultados, en la medida que se justifiquen económicamente, se obtienen rápidamente. Todo proyecto debe mostrar en cifras la eficacia y la eficiencia de las variables del proceso, antes, durante y al finalizar el proyecto.

7.5.2 El Benchmarking

Una técnica muy utilizada durante la implementación de la metodología TPM, es la búsqueda de las *mejores prácticas*. El término en ingles que referencia tal procedimiento se conoce como *Benchmarking*. El Benchmarking es un proceso sistemático para comparar y evaluar productos, servicios o procedimientos de trabajo que permite mejorar los propios; vale decir, *aprender del que mejor hace las cosas*. Mirando y analizando cómo otro realiza una buena práctica puede asimilarse el conocimiento y acelerar el proceso de aprendizaje.

Sin embargo, es importante destacar ya a esta altura que la aplicación del benchmarking en Mantenimiento, si bien es atractivo, debe hacerse con cuidado. La consideración obedece al hecho que, como se sabe, el contexto operativo juega un papel preponderante en la gestión de fallas[1]. Lamentablemente, y como vimos en secciones anteriores, en Mantenimiento no todo (más bien poco) es replicable. Hay quienes confunden benchmarking con *copiar* o *replicar* y, lo que es peor, exigir el mismo resultado a todo sistema productivo solamente porque es apenas similar.

Éste suele ser un mal hábito en ciertas administraciones industriales al suponer que es posible y justo exigir los mismos resultados, por ejemplo de eficiencia o confiabilidad, a líneas de producción similares. Un sistema puede ser aparentemente idéntico a otro pero estar sujeto a factores de contexto diferentes que condicionan la posibilidad de mejorarlo por medio de la *replicación directa*. Téngase en cuenta que el mejor Plan de Mantenimiento de un activo puede ser el peor para otro idéntico, si tiene parámetros de funcionamiento diferentes del primero.

Un proceso de benchmarking se considera satisfactorio aún alcanzando mejoras menores o parciales con respecto al sistema utilizado como punto de referencia.

7.5.2.1 Tipos de Benchmarking

Para el caso que nos ocupa – Mantenimiento – un proceso de benchmarking puede aplicarse con cierto beneficioso para optimizar procedimientos operativos. Hay empresas que poseen varias líneas de producción similares. Supóngase que el área de mantenimiento ha sugerido algún tiempo atrás un procedimiento para reemplazar un conjunto de piezas con cierta frecuencia en todas sus líneas (mantenimiento preventivo). Es posible que dicho trabajo sea hecho por distintos grupos de personas. Al cabo de cierto tiempo cabe preguntarse cómo serán los resultados de los diferentes grupos de trabajo en lo referente a tiempo de ejecución, confiabilidad de la reparación, tiempo medio entre fallas (MTBF) de cada línea, seguridad, etc. Podría sorprendernos que ante la aplicación del mismo procedimiento, cada línea productiva obtenga resultados distintos.

Evaluar y estudiar la forma en que la *mejor línea* realiza el trabajo de reemplazo de piezas, puede beneficiar al resto, en la medida que tales diferencias sean aplicables de acuerdo al contexto operativo de cada una. Muchas veces se ha observado que los miembros de un grupo introducen pequeñas modificaciones al procedimiento original mejorándolo significativamente. Por lo general, esas alteraciones pasan desapercibidas; el benchmarking identifica tales oportunidades de mejora y las aprovecha en el resto de los sistemas.

El ejemplo anterior constituye un caso de *benchmarking interno* dado que la observación del punto de referencia se hace con respecto a una unidad o procedimiento propio. Mirar sólo procedimientos internos es una limitante para la organización. Las empresas que solamente miran hacia dentro, no permiten ser influenciadas por mejores prácticas externas. Un proceso de benchmarking interno es rápido pero limitado. Por este motivo en ocasiones se recomienda efectuar benchmarking externo porque, aún siendo más lentos e insumir más recursos, poseen mayor potencia de mejora.

---

1 Ver sección 1.1.1 "Hipótesis del Contexto" Capítulo 1.

El *benchmarking externo* es aprender del que más sabe cuando éste se encuentra fuera de la organización. Un benchmarking externo no se limita sólo a evaluar los mismos productos, servicios o procedimientos. Puede suceder que una organización tenga inconvenientes en su sistema de distribución de producto terminado y que ésta no sea una etapa significativa en su negocio. Lo ideal sería estudiar y evaluar sistemas logísticos de empresas líderes que se dedican exclusivamente a la distribución de productos. Otro ejemplo lo constituyó una industria de procesos dedicada a la fabricación de productos químicos que posee un molino de bolas como eslabón de su cadena productiva. Para mejorar el subproceso de molienda recurrió a empresas vinculadas a la elaboración de cemento cuya actividad se basa, casi principalmente, en la molienda del material.

Esto significa que una empresa que tiene ***poca*** *actividad de algo aprende de aquella que tiene* ***mucha*** *actividad de lo mismo*, aún no existiendo relación alguna entre ambos negocios.

7.5.2.2 Pasos de un proceso de Benchmarking

Cualquiera sea el tipo de benchmarking deben seguirse, al menos, los siguientes pasos.

√ Definir el alcance y los objetivos del proyecto.

√ Constituir un equipo de trabajo multidisciplinario capaz de llevar adelante el proyecto e implementar las recomendaciones surgidas de él.

√ Seleccionar el sector, proceso, sistema o procedimiento que debe ser mejorado.

√ Seleccionar la empresa, sector, proceso, sistema o procedimiento que se utilizará de referencia. Este paso debe asegurar que la referencia escogida pueda ser efectivamente consultada.

√ Determinar las herramientas y los métodos de evaluación / investigación que se utilizarán para estudiar la referencia.

√ Establecer indicadores capaces de medir objetivamente el desempeño del proceso que se desea mejorar.

√ Seleccionar los indicadores que mejor reflejen la diferencia entre el proceso evaluado y el proceso a mejorar (GAP[1]). En función de dicha evaluación, determinar las causas que producen la diferencia de performance.

√ Identificadas las prácticas que producen los mejores resultados, analizar la posibilidad de asimilarlas total o parcialmente en el proceso a mejorar.

√ Proponer e implementar un plan de acción para llevar adelante las mejoras propuestas.

√ Revisar regularmente los resultados de las acciones implementadas y realizar los ajustes necesarios. Téngase en cuenta que el *benchmarking* es un proceso continuo de mejora.

En la figura 7.5.4 se resumen las herramientas de mejora analizadas, y su grado de aporte según sea la problemática a resolver.

---

1 GAP, del término en inglés

METODOLOGÍA / CONCEPTO / OBJETIVO	RCM	Pareto	Tormenta de Ideas	Por qué - Por qué	Diagrama causa-efecto	5W + 1H	Análisis P - M	RCA	Árbol de Fallos	Árbol de Eventos	TPM	Six Sigma	Bench marking	FMEA	HAZOP
Formular Estrategias de Mantenimiento	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◒	○	○	◒	○
Identificar Modos de Falla	●	○	◒	◒	●	◒	●	◒	●	○	○	○	○	●	○
Identificar Causas Raíz Complejas	◒	○	○	○	◒	◒	●	◒	●	○	○	◒	○	◒	○
Identificar Causas Raíz Humanas	◒	○	◒	◒	●	◒	◒	●	◒	○	◒	◒	◒	◒	◒
Identificar Causas Raíz Latentes	◒	○	◒	◒	●	◒	◒	●	◒	○	◒	◒	◒	◒	◒
Cuantificar Riesgo Industrial	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○	◒	○	◒	◒
Determinar Severidad de los Fallos	◒	◒	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	◒	◒
Priorizar Tareas / Eventos	◒	●	○	○	○	○	○	◒	○	○	◒	○	○	○	○
Reducir Riego de Accidente	●	○	○	◒	○	○	◒	◒	◒	◒	●	●	○	◒	●
Reducir Riesgo de Contaminación	●	○	○	◒	○	○	◒	◒	◒	◒	●	●	○	◒	●
Identificar Acciones Inseguras	◒	○	◒	◒	◒	◒	◒	◒	○	◒	◒	●	◒	◒	●
Aumentar la Confiabilidad	●	○	○	○	○	○	◒	●	◒	◒	◒	●	◒	◒	◒
Aumentar la Mantenibilidad	●	○	○	○	○	○	◒	◒	○	○	◒	◒	◒	◒	○
Reducir Gastos de Mantenimiento	●	○	○	○	○	○	◒	◒	○	○	●	●	◒	○	○

Gran aporte	●
Regular aporte	◒
Sin aporte	○

Figura 7.5.4
Cuadro comparativo del aporte de cada metodología según conceptos u objetivo.

Resumen de aplicación

7.1 Introducción

- *Toda actividad industrial quiere ser continuamente mejorada. Cada vez más, nuevos métodos hacen su aporte para optimizar los procesos de gestión.*

7.1.1 Nuevos Criterios

- *Es preciso destacar la figura del mantenedor como profesional capaz de prevenir las consecuencias de las fallas. El mantenedor recurre a la reparación de averías sólo si no se pudieron evitar o si es más conveniente corregirlas que evitarlas. Si buena parte de las fallas no pueden evitarse (no se tiene control sobre los modos de falla), la Planta en lugar de operar está siendo reparada constantemente.*

- *Para alcanzar altos estándares de utilización de activos (disponibilidad) deben aplicarse herramientas de gestión como las que se proponen más adelante.*

7.1.2 Documentación Técnica

- *En ciertas ocasiones la información suministrada por fabricantes y proveedores es escasa o de bajo nivel técnico, lo que obliga a improvisar procedimientos y a interpretar estándares de funcionamiento de forma particular. Por tal motivo, hay dos funciones del área Ingeniería de Mantenimiento que son fundamentales: la Gestión de la Información y el Manejo del Cambio.*

7.1.3 Prueba y Error

- *La presión para lograr objetivos en el corto plazo, y fundamentalmente la falta de conocimientos sobre métodos de optimización e investigación de fallas, es la causa de que con frecuencia se recurra a las pruebas reiteradas (prueba y error) para solucionar problemas.*

- *Hay una tendencia natural a inclinarse al rediseño como primera medida preventiva. Si bien un rediseño puede minimizar, e incluso evitar, que ocurra un modo de falla, también puede incorporar muchos otros. El rediseño constituye una acción válida sólo cuando fueron agotadas todas las instancias previas ofrecidas por las acciones pro-activas.*

7.1.4 Aplicar correctamente la tecnología correcta

- *Mantenimiento es responsable por escoger la herramienta correcta para cada situación y aprovechar de ella los máximos beneficios. En los últimos tiempos se han hacho importantes avances en técnicas predictivas. Aún así, siempre hay que evaluar cada tecnología cuidadosamente para conocer sus ventajas y limitaciones. El Ingeniero de Mantenimiento debe informar y divulgar la realidad de cada técnica, y evitar que se caiga en falsas expectativas. No hay método ni tecnología que por sí sola evite o prediga todos los modos de falla de un equipo.*

- *En la gestión de activos fijos, no siempre es mejor hacer mucho; hay que hacer lo justo en el momento justo.*

7.2 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

- *El RCM (Reliability Centred Maintenance) es un método estructurado, deductivo y participativo que define la estrategia de mantenimiento más apropiada para cada equipo actuando en su contexto operativo real.*

- *El RCM no busca únicamente resolver problemas de confiabilidad, va más allá de ello e introduce un cambio cultural respecto a los conceptos a tener en cuenta al momento de pensar en Mantenimiento.*

- *Otro aspecto importante es que, aunque las empresas cuenten con personal altamente capacitado para resolver problemas, carecen de práctica para aplicar métodos que puedan integrar los conocimientos dispersos en las mentes de los colaboradores. Sólo una integración verdadera del conocimiento puede reducir el riego de falla y los costos de mantenimiento.*

- *El RCM prioriza el análisis de aquellos modos de falla cuyas consecuencias afectan la seguridad de las personas o impactan sobre el medio ambiente.*

7.2.1 Reseña Histórica

- *La metodología RCM surge como una adaptación del ámbito aeronáutico. Los primeros antecedentes filosóficos datan de un documento publicado en 1978 por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y escrito por F. S. Nowlan y H. F. Heap. A través de los años, estas ideas innovadoras se fueron mejorando y adaptando a distintas aplicaciones hasta convertirse en lo que hoy se conoce como RCM.*

7.2.2 Beneficios y Alcance de un Análisis RCM

- *El paradigma fundamental es la conservación de las funciones del sistema. El plan de mantenimiento surgido de RCM puede arrojar cualquier tipo de tarea: mantenimiento a condición (predictivo / proactivo), reacondicionamiento programado (preventivo), reemplazo programado (preventivo), rutinas de limpieza, lubricación, calibración o ajuste (preventivo), búsqueda de fallos ocultos (detectivo), inspección operativa autónoma (IOA), etc.*

7.2.3 Metodología de Trabajo

- *Para formar un grupo de análisis RCM se recurre a las personas que más conocen la máquina. Pueden ser operadores, técnicos, supervisores (producción y mantenimiento), lubricadores, proveedores, especialistas en seguridad e higiene, etc.*

- *Es importante que los integrantes del grupo tengan un criterio de pensamiento amplio y una conducta expeditiva; tal vez más importante que su antigüedad. La cantidad de participantes regulares nunca debe superar las 6 ó 7 personas.*

- *El equipo se reúne regularmente y es liderado por un Facilitador que debe estar altamente capacitado y experimentado en RCM (área metodológica), aunque también debe tener conocimiento tecnológico. Su función es asegurar el estricto cumplimiento de cada paso y lograr el consenso entre los asistentes.*

- *No se recomienda que a las reuniones asistan regularmente los Jefes o Gerentes de Mantenimiento, ni que hagan las veces de facilitador. Esto no significa que el método descarte la participación de estas personas. Su contribución es importante pero fuera de las reuniones habituales. El facilitador presentará a los Jefes cada 4 ó 5 reuniones, un resumen con el avance alcanzado.*

- *Para el éxito de una implementación RCM se debe obtener apoyo y compromiso de la alta Dirección, desarrollar un Master Plan de Implementación, desarrollar facilitadores con capacidad de liderazgo, mantener la disciplina en las reuniones de trabajo, convocar personas sensatas, proactivas, expeditivas, críticas y no disociadoras, hacer que la jefatura de mantenimiento evalúe los resultados y las recomendaciones que surjan del análisis y no sancionar los errores humanos (no intencionales).*

- *Para hacer un análisis RCM es importante el conocimiento de los integrantes del grupo. El histórico de fallas técnicas sirve para validar ciertos modos de falla dominantes porque lamentablemente ni siquiera en fallas con graves consecuencias, se dispone siempre de información de calidad y en la cantidad suficiente como para hacer estimaciones confiables.*

7.2.4 Pasos de un Análisis RCM

- *El RCM responde siete preguntas fundamentales: ¿cuáles son las funciones del sistema?, ¿de qué forma no se cumplen las funciones (fallas funcionales)?, ¿cuáles son las causas (modos de falla) que provocan las fallas funcionales?, ¿qué sucede cuando ocurre cada modo de falla?, ¿qué consecuencias provoca cada modo de falla?, ¿qué puede hacerse para evitar, predecir o detectar cada modo de falla? y, ¿cómo proceder si no es posible evitar, predecir o detectar cada modo de falla?*

- *Las cuatro primeras preguntas generan una planilla denominada Hoja de Análisis.*

- *La segunda etapa (respuesta a las 3 últimas preguntas) define las tareas de mantenimiento más efectivas y económicas o las acciones alternativas (reactivas) en caso de no encontrarlas, todo ello con ayuda de un diagrama de decisión al que se somete cada modo de falla.*

- *Dentro de las acciones alternativas se destaca el Rediseño (Mantenimiento Mejorativo) como acción de mejora y la no realización de ninguna acción pro-activa de mantenimiento programado (NAP); vale decir, hacer solamente mantenimiento correctivo.*

- ***Contexto Operativo**. Debe documentarse antes de enumerar las funciones, evitando la redacción exagerada pero asegurando que pueda ser comprendido por toda persona del ámbito industrial.*

- ***Funciones**. Las funciones son las expectativas que los usuarios y mantenedores tienen con respecto al activo. Deben listarse en orden numérico en la primera columna de la Hoja de Análisis. Las funciones de los equipos hacen posible que el sistema satisfaga los requerimientos del proceso productivo.*

- ***Fallas funcionales**. Es un estado a partir del cual un equipo es, total o parcialmente, incapaz de cumplir el parámetro de funcionamiento definido en sus funciones. Las fallas funcionales pueden ser fallas parciales en las que el activo aún funciona pero con un nivel de desempeño inaceptable.*

- ***Modos de falla**. Son eventos (causas raíz) que pueden ocurrir en el componente y provocar la falla funcional del equipo al que pertenece. Una falla funcional puede ser originada por más de un modo de falla y, además, un mismo modo de falla puede ser el responsable de causar más de una falla funcional. Los modos de falla se enumeran en la tercera columna de la Hoja de Análisis.*

- ***Efectos de los fallos**. La cuarta y última columna de la Hoja de Análisis se usa para describir la secuencia de lo que sucedería si se produce el modo de falla.*

- *No debe confundirse el efecto con la consecuencia del fallo; el primero tiene que ver con la descripción secuencial de lo acontecido, mientras que la consecuencia cuantifica su impacto.*

- ***Consecuencias de los fallos.*** *En este punto se analiza qué importancia tiene cada modo de falla. Para analizar las consecuencias de los fallos se utiliza un diagrama de decisión (ver figura 7.2.10).*

- *Ninguna tarea de mantenimiento seleccionada a través del diagrama de decisión, es excluyente con respecto a tareas básicas de lubricación, limpieza, chequeos de recorrida o ajustes menores, en la medida que su aplicación combinada no sea más perjudicial que las consecuencias que se pretenden evitar.*

- *El RCM prioriza las tareas de mantenimiento a condición (predictivo / proactivo) por sobre las de reacondicionamiento y sustitución programada. Este orden no debe alterarse.*

- *La información obtenida del diagrama de decisión se trata en la Hoja de Resultados que contendrá finalmente el Plan de Mantenimiento del activo. Ver figura 7.2.11.*

7.2.5 Reuniones de Trabajo

- *En las reuniones de trabajo deben evitarse las discusiones y el exceso de análisis. Además, debe asegurarse la asistencia de todos los integrantes, evaluarse quincenalmente los indicadores de avance del proyecto y comunicarse las recomendaciones rápidamente. Luego de la auditoria final o cierre, debe asegurarse que el plan de mantenimiento y los rediseños se implementen adecuadamente.*

7.2.6 Ventajas y Desventajas del RCM

- *Un análisis RCM, con adecuado rigor de análisis, es capaz de identificar más del 95% de los modos de falla de un sistema y proponer con éxito más del 90% de las estrategias de mantenimiento. Los activos físicos analizados bajo RCM demuestran tener un menor riesgo en seguridad y un menor impacto en el medio ambiente. En muchos casos se produce una rápida reducción de los gastos de mantenimiento y un aumento considerable de la confiabilidad y disponibilidad. Se reducen los tiempos de reparación, seleccionando aquellas tareas exclusivamente necesarias para sostener las funciones del equipo. Aumenta el conocimiento técnico de los integrantes del grupo (más personas saben más cosas).*

- *La profundidad alcanzada en la definición de los modos de falla depende del grado de experiencia y capacidad técnica (de diagnóstico) de los participantes. Si el estudio de los modos de falla no es riguroso, suelen omitirse los potenciales errores humanos que el grupo tiende a ocultar. Ciertos análisis se tornan extensos por lo que nunca es recomendable revisar varios subsistemas simultáneamente.*

7.3 Técnicas de ayuda para el Análisis de Fallas

7.3.1 Principio de Pareto

- *El principio de Pareto establece que, en la mayoría de los casos, un problema es originado por un grupo pequeño de un total de causas posibles. El diagrama que surge como consecuencia de aplicar este principio se denomina Diagrama de Pareto y permite identificar las causas de mayor importancia y magnitud capaces de provocar el efecto o inconveniente estudiado.*

- *Según este principio, y en cualquier conjunto de elementos, eventos o causas, unos pocos factores son más significativos que el resto; razón por la cual, se los llama los pocos y significativos. También conocida como regla del 80-20, asegura que casi siempre existen pocas (≈20%) causas que contribuyen mayoritariamente (≈80%) a generar el efecto total.*

- *Para construir un diagrama de Pareto se debe definir el problema a estudiar, listar todos los eventos (o causas) y la pérdida parcial con que contribuye cada uno, sumar las pérdidas parciales para obtener la pérdida total del conjunto, ordenar los eventos (o causas) descendentemente de acuerdo a la pérdida que provoca cada uno, calcular el porcentaje que representa cada evento (causa) con respecto al total (100%), hacer la suma acumulada de las contribuciones porcentuales desde la mayor a la menor, confeccionar un diagrama de barras con la pérdida de cada evento ordenado descendentemente y seleccionar los eventos (o causas) cuya suma acumulada sea igual o mayor al 80% de la pérdida total.*

7.3.2 Tormenta de Ideas (Brainstorming)

- *Una tormenta de ideas es una herramienta grupal de trabajo que se aplica corrientemente - y a veces inconscientemente - para determinar las causas de un problema o plantear las que podrían provocarlo.*

- *Es un proceso participativo y creativo que se nutre del conocimiento (e imaginación) de los integrantes del grupo. Se utiliza como herramienta de aproximación inicial para listar modos de falla en una revisión RCM o para construir un Diagrama Causa - Efecto.*

- *El grupo debe permanecer en silencio entre 5 y 15 minutos aproximadamente, pensando y anotando las ideas. Establecido un orden, cada miembro propone una idea por vez en forma clara y sencilla, no se permiten críticas ni comentarios. El moderador anota la idea en el lugar designado para tal fin y visible para todos. La aceptación de cada idea es por votación o breve discusión entre los miembros.*

7.3.3 Técnica del Por qué - Por qué

- *Se utiliza para análisis simples o iniciales, aunque siempre debe procurarse la evidencia que ratifique la respuesta a cada pregunta.*

- *El proceso deductivo que propone el método se materializa por medio de una planilla de registro en la que se vuelcan inicialmente los datos de cabecera junto a una breve descripción del fenómeno. Luego, hay 5 niveles o rondas de* ***por qué****. Si a través de su evidencia una respuesta resultar afirmativa, se vuelve a cuestionar en el nivel siguiente* ***por qué*** *pudo haber ocurrido, y así sucesivamente.*

- *Se considera un método lineal porque hay cierta tendencia a postular una sola respuesta para cada pregunta; vale decir, una sola causa. Su ventaja más importante es la versatilidad, pudiéndose aplicar en infinidad de temas inclusive fuera del ámbito industrial.*

7.3.4 Diagrama Causa - Efecto (Diagrama de Ishikawa)

- *Un diagrama Causa - Efecto permite visualizar rápidamente aquellas causas (modos de falla) que podrían derivar en una falla funcional (efecto) de un sistema complejo.*

- *Para confeccionar un diagrama Causa - Efecto participa un grupo de personas lideradas por un moderador. En aquellos análisis RCM que requieren mayor profundidad en sus modos de falla, aparece como una de las herramientas que brinda los mejores resultados. Las mismas personas (y el facilitador) que conforman el grupo de revisión RCM pueden confeccionar un diagrama de Ishikawa.*

- *Para construir el diagrama se comienza definiendo brevemente el efecto (falla funcional) y se lo ubica dentro de un rectángulo a la derecha o izquierda del esquema. Luego, un eje central canaliza el aporte de las posibles causas que, a su vez, se agrupan según características que se denominan factores. De cada factor "cuelgan" las causas primarias dentro de las cuales se encontrarán las causas raíz.*

7.3.5 Técnica de las 5W + 1H y el Análisis de Fallas (ADF's)

- *La técnica de las 5W + 1H consiste en responder una serie de preguntas cuyas respuestas facilitan la descripción de un problema, falla o evento acontecido. Las palabras que dan origen a su nombre, y en las que se basa el método, son:*

- ***Qué** (What). Se pretende saber cuál fue el efecto concreto durante la eventualidad. ¿Qué sucedió cuando se manifestó?, ¿cuál es el problema que se observó?*

- ***Cuándo** (When) ¿Cuándo se produjo el problema, en qué ocasiones sucedió?*

- ***Dónde** (Where) ¿Dónde se observó el problema o efecto desfavorable? Debe hacerse una declaración específica del lugar de la máquina en la que ocurrió.*

- ***Quién** (Who). Se trata de ver si el problema se relacionó con la habilidad de alguna persona. Bajo ningún concepto tómese esta pregunta para hallar culpables; sólo pretende detectar los factores que pueden ayudar a describir el fenómeno de manera objetiva.*

- ***Cuál** (Which). Aquí se pregunta ¿cuál es el patrón con que se observa el problema, es una tendencia de repetición aleatoria o presenta algún patrón definido?*

- ***Cómo** (How) ¿De qué forma se aparta la situación actual de la ideal, cómo se manifiesta el fenómeno?*

- *En el ámbito del Mantenimiento suele combinarse la técnica del Por qué - Por qué con las 5W + 1H a través de una planilla de trabajo denominada Planilla de ADF (ver Anexo VII).*

7.3.6 Análisis P-M (Physical Mechanism)

- *Las fallas funcionales crónicas se caracterizan por ser de alta repetibilidad y por provocar un impacto de consecuencias no mayores. Si la consecuencia de cada falla crónica fuese grave, decididamente la organización no podría tolerarla y la habría corregido oportunamente. No obstante, tomadas conjuntamente y a través de cierto horizonte de análisis, producen grandes perjuicios económicos (o de otra índole) y representan una oportunidad de mejora considerable.*

- *El Análisis P-M, también conocido como método de los principios físicos, es un procedimiento eficaz para examinar y resolver fallas crónicas. A través de un estudio del **cómo** los fenómenos físicos ocurren sobre los componentes, es posible acercase a la meta del cero defecto. Es útil para apoyar métodos de decisión como el RCM.*

- *En un análisis P-M las personas involucradas deben tener conocimientos mínimos de física, química, matemática y especialidades como termodinámica, mecánica, mecánica de fluidos, estabilidad, óptica, resistencia de materiales, etc. Los pasos para desarrollar una análisis P-M son los siguientes:*

- ***Comprender el fenómeno**. Se busca entender el funcionamiento de la máquina (sistema) y reunir las evidencias suficientes para identificar las anormalidades.*

- ***Efectuar un análisis físico**. Este paso debe explicar cómo sucede el fenómeno y las anormalidades (fallos, defectos o pérdidas), sin importar por el momento, las respuestas al **por qué**. Se deben estudiar objetivamente los principios básicos de funcionamiento, entender los procedimientos de operación del sistema, evaluar **cómo** se relacionan los elementos para originar el problema y cuantificar los cambios físicos que se producen cuando ocurre la anormalidad.*

- ***Examinar todas las condiciones.*** *Se analizan todas las condiciones que están relacionadas con la anormalidad. Habitualmente se usa una serie de diagramas de Ishikawa.*

- ***Estudiar las causas.*** *En este paso se buscan las relaciones causa - efecto potencialmente capaces de provocar los desvíos aplicando, por ejemplo, la categoría A del diagrama de Ishikawa (Método, Máquina, Materiales y Mano de Obra).*

- ***Establecer condiciones óptimas de funcionamiento.*** *El método impone establecer las condiciones óptimas de funcionamiento. Una anormalidad puede quedar en evidencia sólo si se establecen objetiva y explícitamente las condiciones de operación deseadas.*

- ***Medir cada causa de anormalidad.*** *En función de lo establecido en el paso anterior debe medirse cada anormalidad (desvío o defecto) contra la situación normal, con el fin de cuantificar claramente las pérdidas. Debe escogerse una unidad de medida y una técnica de medición confiable.*

- ***Determinar las anormalidades a corregir.*** *Se listan en principio todas las anormalidades medidas en el paso anterior. Luego, se determina cuáles provocan verdaderamente una pérdida.*

- ***Proponer e implementar acciones de mejora.*** *A diferencia de otras metodologías, los integrantes de un análisis P-M no sólo identifican las anormalidades sino que también buscan eliminarlas. Para ello, el grupo propone e implementa las acciones de mejora surgidas de su propio estudio.*

- ***Replicar la solución.*** *Aún teniendo en cuenta que cualquier diferencia en el contexto operativo puede invalidar toda intención de replicar y aprovechar un hallazgo en otro lugar, siempre es útil, al menos, evaluar la posibilidad de beneficiarse con las mejoras en otras instalaciones que están sufriendo las mismas o similares anormalidades.*

- *Un Análisis P-M es muy riguroso por lo que no es apropiado esperar resultados a corto plazo. Téngase en cuenta que con esta técnica podemos erradicar pérdidas marginales; vale decir, aquellas fallas o defectos crónicos - de bajo impacto por evento - imposibles de evitar con otros métodos.*

7.3.7 Análisis Causa - Raíz de Falla (RCA)

- *Es un proceso estructurado y deductivo para identificar causas primarias (raíces) que desencadenan en una falla funcional, problema o incidente. Es una herramienta estructurada que permite aumentar o mantener la Confiabilidad de los Sistemas Productivos, poniendo de manifiesto las causas raíces tanto de fallas crónicas (recurrentes) como de las esporádicas.*

- *Un Análisis RCA puede usarse para eliminar fallas crónicas, evitar la recurrencia de fallas esporádicas, corregir errores humanos durante los procesos de operación o mantenimiento, investigar causas de un accidente (o incidente), estudiar los orígenes de una falla funcional, etc.*

- *Se confecciona un listado con los problemas (o fallas) que están perjudicando a la empresa, luego se los clasifica y cuantifica económicamente. A continuación, el facilitador designado para conducir el análisis, selecciona los integrantes del grupo. El personal debe ser idóneo y conocer en profundidad el proceso. El siguiente paso tiene como objetivo deducir las verdaderas causas que originan el problema. Con la información reunida, y con ayuda de un Árbol Lógico, se arma la estructura descendente efecto - causa que conduce a los orígenes de la falla.*

7.3.8 Árbol de Fallos

- *El estudio de una falla (evento final no deseado) mediante un Árbol de Fallos se describió en la sección 5.2.4.3 del Capítulo 5.*

7.3.9 Árbol de Eventos

- *Es una técnica capaz de cuantificar la probabilidad de ocurrencia de fallas simultáneas – a partir de una o más fallas funcionales, ocultas o evidentes – con alto perjuicio en seguridad. Para sistemas con muchas redundancias y salvaguardas (relacionadas funcionalmente o no) puede ser conveniente "probar en tablero" dichas seguridades antes de poner en servicio la instalación. En la sección 5.2.4.4 del Capítulo 5 se desarrolla esta metodología.*

7.4 Mantenimiento Productivo Total (TPM)

- *El TPM se originó, desarrolló y optimizó en Japón en la industria automotriz con la finalidad de mejorar los procesos productivos y alcanzar altos niveles de calidad. Implementar TPM excede ampliamente al área de Mantenimiento; requiere la participación de todos los niveles y sectores de la organización.*

7.4.1 Objetivos del TPM

- *El objetivo es aumentar la eficacia integral de los activos fijos instalados y, con ello, la competitividad y flexibilidad de la empresa. Algunas compañías interpretan erróneamente este punto y reducen inicial y drásticamente los gastos operativos instantáneos, sobre todo los correspondientes a mano de obra. Comienzan con reestructuraciones devastadoras que no hacen más que socavar la confianza de los trabajadores (que quedan) obteniendo un resultado opuesto al buscado.*

- *El TPM requiere que la* ***persona*** *asuma compromisos diferentes y logre una evolución en su forma de afrontar el trabajo; un cambio cultural profundo en sentido vertical desde las más altas esferas de la empresa hasta el colaborador de menor responsabilidad.*

- *Uno de los objetivos más importantes es eliminar los defectos (físicos y metodológicos) de tipo crónicos para alcanzar estándares de calidad y eficiencia supremos. Un objetivo indirecto o alternativo, es lograr que mejore el comportamiento de los empleados.*

7.4.2 Beneficios esperados de su aplicación

- *Eliminar pérdidas crónicas, mejorar la disponibilidad de equipos, reducir los gastos de mantenimiento, eliminar fuentes de contaminación, disminuir el impacto ambiental, reducir el riesgo de accidentes e incidentes, mejorar el ambiente de trabajo, mejorar el bienestar de los trabajadores, etc.*

7.4.3 Proceso de Implementación

- *Para llevar adelante una implementación TPM la compañía debe cumplir las siguientes etapas: Crear un Comité Directivo y anunciar la decisión, capacitar al Comité Directivo y hacer una fuerte campaña de difusión, crear la estructura necesaria para promover el TPM y educar a los involucrados, definir las*

políticas internas y establecer metas y objetivos, desarrollar y aprobar un Plan Maestro (Master Plan), lanzar el Proyecto (Kick-off) con un Plan Piloto e implementar los Pilares TPM en la secuencia fijada por el Master Plan.

7.4.4 Pilares TPM

- *Un sistema de Gestión Industrial que pretenda aplicar TPM debe conducir los esfuerzos con procesos que articulen los distintos campos de la herramienta. El TPM los llama "Pilares" y son 8 estos canales conductores que vinculan el accionar de los sectores funcionales de la compañía. Cada Pilar se divide en Pasos, cuyo despliegue deberá ser gradual y sistemático.*

- ***Pilar Mantenimiento Autónomo** (Jishu Hozen). El Mantenimiento Autónomo (MA) pretende alcanzar la autogestión plena de los operadores haciendo que asuman responsabilidades sobre las máquinas. Mantenimiento transfiere inicialmente tareas de primera línea (first line) como limpieza, lubricación, purga, ajustes menores y hasta cambio de algunas piezas. Conforme progresan las competencias y habilidades de los operadores, van asumiendo otras rutinas de mayor complejidad hasta alcanzar gran protagonismo en la gestión total del sistema. Sin embargo, la eficacia, eficiencia y efectividad del trabajo autónomo será siempre responsabilidad de Mantenimiento. Los especialistas de Mantenimiento deben capacitar a los operarios de producción transfiriéndoles destrezas y habilidades. Esto descomprime al plantel de mantenimiento para que pueda dedicarse a trabajos de mayor envergadura como el análisis de fallas crónicas y complejas. Una ventaja adicional del MA es que los operadores se transforman en "diagnosticadores" dada su cercanía a las instalaciones. **Pasos del Pilar**: Limpieza inicial, eliminación de fuentes de contaminación, establecimiento de estándares (procedimientos) de limpieza e inspección, inspección general de máquina y proceso, y sistematización del mantenimiento autónomo.*

- ***Pilar Mantenimiento Planeado** (Keikaku Hozen). El propósito del Pilar Mantenimiento Planeado (MP) es el "cero averías". Además, se buscan reducir los gastos operativos y de mantenimiento. Con una planificación rigurosa, el MP puede reducir drásticamente el tiempo de ejecución de los trabajos, el consumo de repuestos y el riesgo de accidentes. Durante un despliegue de MP, el departamento de mantenimiento puede ocuparse de mejorar la Gestión Administrativa de los procesos internos del sector. El Mantenimiento Preventivo Periódico (MPP) y el Mantenimiento Basado en Condición juegan un papel protagónico. El TPM propone estabilizar el MTBF (con limpieza, lubricación y ajustes regulares) para establecer intervalos seguros de mantenimiento preventivo y predictivo. En la práctica, y como fuera enunciado en el Capítulo 2, esto aún es válido para los casos en que la dispersión de las fallas es baja. Además de estabilizar el MTBF, es preciso que haya baja dispersión, lo cual se logra eliminando o "limpiando" algunos modos de falla con un buen nivel de Condición Básica. Un despliegue de MP debe diseñar estándares específicos de inspección, control, recambio y reparación. Cada intervención debe contar con un Instructivo de Trabajo (IT) que detalle las tareas y el tiempo de ejecución estimado. **Pasos del Pilar**: Definir un criterio para priorizar los equipos (criticidades), seleccionar las máquinas sobre las que se desplegará el Pilar, eliminar el deterioro acumulado de los activos seleccionados, crear o mejorar el sistema de información, mejorar el proceso de mantenimiento periódico, mejorar el proceso de mantenimiento predictivo y optimizar integralmente el proceso de Mantenimiento.*

- ***Pilar Mejora Enfocada** (Kobetsu Kaizen). Las actividades de este Pilar orientan los esfuerzos de un grupo de personas para resolver problemas específicos, concretos y de cierta complejidad. Se forma un equipo interdisciplinario con personal de producción, especialistas de mantenimiento, ingenieros o cualquiera que conozca y tenga alguna vinculación con el tema a resolver. Luego, se aplica un método del tipo "paso a paso" basado en el conocido Ciclo de Deming o PHVA (Planificar - Hacer - Verificar - Actuar). **Pasos del Pilar**: Seleccionar el problema a resolver (pérdida), formar un Grupo de Trabajo con las personas relacionadas con el tema y aplicar el proceso iterativo PHVA, evaluando la situación*

actual y cuantificando las pérdidas, diagnosticando el problema, planificando la eliminación de las causas, coordinando las acciones que eliminarán las causas, implementando las mejoras planificadas y, por último, midiendo los resultados obtenidos.

- ***Pilar Gestión Temprana** (GT). Gestión Temprana es un Pilar que tiene como objetivo garantizar que las nuevas Unidades Productivas (componentes, equipos o sistemas) operen satisfactoriamente desde la puesta en marcha. Todo Proyecto de Inversión debe alcanzar rápidamente el régimen nominal de producción (capacidad deseada), sin fallas iniciales ni arranques reiterados. La metodología asegura que el tiempo previsto entre el diseño y la puesta en marcha, se cumpla sin retrasos. Se pretende eliminar precozmente los problemas de diseño y los errores de fabricación. **Pasos del Pilar**: Selección y justificación del Proyecto, planificación, diseño y documentación de la información, preparación de la documentación para la puesta en marcha, puesta en marcha y, por último, pruebas o chequeos de régimen.*

- ***Pilar Mantenimiento de Calidad** (MC) (Hinshitsu Hozen). El objetivo principal del Pilar es evitar, con acciones regulares de mantenimiento o mejoras (rediseños), las pérdidas de calidad en los productos (intermedios o finales), permitiendo acercarse a la meta del "cero defecto". **Pasos del Pilar**: Evaluar la condición actual del sistema con respecto a la calidad, estudiar los mecanismos de falla que provocan los defectos, implementar mejoras concretas, asegurar la calidad con estándares de mantenimiento y operación, evaluar los resultados de las acciones propuestas y consolidar los aprendizajes y mejoras.*

- ***Pilar Capacitación y Desarrollo** (CyD). Este Pilar es un soporte para articular los demás procesos del TPM. Sus acciones están dirigidas a cubrir aspectos metodológicos (formación en TPM), aspectos técnicos y de autogestión. Cada función (puesto de trabajo) debe tener una descripción detallada de los requisitos de aptitud y actitud a satisfacer por el empleado. El departamento de RRHH debe medir los conocimientos y habilidades de cada individuo usando matrices de habilidad. La metodología demanda un alto grado de polivalencia en los empleados. Es importante que la compañía cuente con un Plan Maestro de Capacitación (PMC) basado en las matrices de habilidad, cuyo horizonte de validez concuerde con los objetivos directivos del Master Plan TPM. Dos son los aspectos sobre los que trabaja el Pilar CyD. El primero, elevar o adecuar el nivel técnico de los colaboradores hasta las necesidades de la organización; el segundo, desarrollar la capacidad de gestión y autogestión de cada trabajador. **Pasos del Pilar**: Analizar la situación actual, elaborar un Plan Maestro de Capacitación, realizar la capacitación y/o formación conforme al Plan, evaluar las metas e implementar las correcciones necesarias.*

- ***Pilar Gestión de Sectores Administrativos** (GSA). Este Pilar orienta sus esfuerzos en dos sentidos. El primero apunta a mejorar la eficiencia integral de las tareas administrativas de soporte, reduciendo trabajos innecesarios, demoras, pérdidas energéticas, retrabajos, costos, etc. El segundo, propicia crear ámbitos de trabajo saludables y cómodos. Los trabajadores permanecen muchas horas en sus puestos – en ocasiones más de lo necesario – por lo que debe procurarse que el lugar sea grato y genere el gusto por trabajar. **Pasos del Pilar**: Evaluar la situación actual, plantear objetivos, redefinir funciones y metas, implementar las acciones de mejora, evaluar los resultados y consolidar las mejoras.*

- ***Pilar Higiene, Seguridad y Medio Ambiente** (HSMA). Este Pilar requiere la máxima atención. A través del apoyo metodológico a los demás despliegues del TPM, tiene como objetivo principal luchar por el "cero accidente" y por el cuidado del medio ambiente. En lo referente al mal funcionamiento de las instalaciones, existe una relación casi directa entre los accidentes y las averías. Reduciendo las averías, se reduce el riesgo de accidentes de trabajo. **Pasos del Pilar**: Difundir y educar, nombrar líderes o referentes en Seguridad, medir la situación actual, implementar y controlar acciones de mejora y consolidar la información.*

7.4.5 Relación entre Pilares

- *Se recomienda remitirse directamente a la Tabla 7.4.10.*

7.4.6 Consolidación del TPM

- *La consolidación de los logros alcanzados por la metodología garantiza el éxito a largo plazo. Lo más difícil no es llegar a la meta, sino mantener los valores en el tiempo. El Master Plan TPM planea cada despliegue para obtener los máximos beneficios a mediano y largo plazo.*

7.4.7 Pérdidas y Productividad Total de Equipo

- *El TPM identifica inicialmente 8 tipos de pérdidas que impiden mejorar la efectividad de los equipos, sistemas productivos, sectores o plantas Industriales. Referirse directamente a la Tabla 7.4.11.*

- ***Productividad Total de Equipo** (PTE). Este indicador evalúa simultáneamente todas las deficiencias. Los criterios para medir el tiempo productivo y los indicadores aplicados en cada caso, pueden utilizarse aún sin haber implementado un modelo TPM. La Productividad Total de una unidad productiva se ve afectada por dos factores principales. Por un lado el Grado de Utilización de los activos (GU), y por el otro, la eficacia con que el proceso de fabricación se cumple. Ver ecuaciones correspondientes en el epígrafe 7.4.7.1 y Figura 7.4.16.*

- ***EGE** es un indicador integral de eficacia válido para el tiempo de funcionamiento. Resulta útil para evaluar la eficacia del mantenimiento. Si las tareas de mantenimiento son efectivas, no deberían existir grandes pérdidas por calidad ni por bajo rendimiento operativo. De la misma forma, las detenciones no programadas tendrían que ser mínimas.*

- ***OEE** (Overall Equipment Effectiveness). La Eficiencia Global de Equipo (OEE) es un indicador integral de eficiencia. El cálculo es similar al de Eficacia Global de Equipo (EGE), sólo que la Disponibilidad (D'_O) tiene en cuenta el tiempo de paradas programas (T_{PP}). Ver ecuaciones 7.4.12 y 7.4.13. El OEE permite cuantificar el impacto de las paradas programadas sobre la productividad de los activos. Una tentación es reducir el tiempo destinado a las paradas para mantenimiento programado. Sin embargo, si la reducción es indiscriminada, aumentarán las fallas imprevistas con la consiguiente merma en disponibilidad.*

7.4.8 Ventajas y Desventajas del TPM

- *En TPM tiene como ventaja que es una metodología de gestión integradora; las decisiones tomadas por el equipo directivo terminan implementándose a nivel de la operación. Además, permite administrar la información para difundir el conocimiento transversalmente. Usa y capitaliza la experiencia del personal mejorando sus competencias y habilidades, promueve el autoaprendizaje, la comunicación, el crecimiento personal, la delegación y la motivación. Desarrolla buenas prácticas e intenta replicarlas en procesos similares, reduce el riesgo de accidente, mejora la higiene en el puesto de trabajo, y reduce el consumo de energía y el impacto ambiental. Minimiza los errores humanos (modos de falla humanos), aumenta la Disponibilidad de planta y reduce los Gastos Operativos. Fomenta la cultura del trabajo en equipo y el sentido de "pertenencia", en lugar del individualismo. Cada miembro de la organización conoce el beneficio que aporta a la compañía su trabajo. Descentraliza el Mantenimiento reduciendo la cantidad de Órdenes de Trabajo a ejecutar por los especialistas de mantenimiento. Las fallas de baja complejidad son resueltas por el personal operativo.*

- *El TPM tiene como desventaja que una errónea interpretación metodológica - por parte de los responsables del Master Plan - puede demorar la eliminación de fallas que afectan la Seguridad o el Medio Ambiente. Gestiona aspectos de la conducta humana; las culturas y las leyes laborales son distintas según los países y suelen presentarse conflictos gremiales a las puertas de los despliegues. Encuentra ciertas limitaciones en las industrias de proceso, es necesario demasiado tiempo y personal para ejecutar las acciones propuestas por cada Pilar y los despliegues dan resultados a mediano / largo plazo.*

7.4.9 Aplicación simultánea e integrada de TPM y RCM

- *La combinación de estas dos metodologías mejora la eficacia de cualquier programa de mantenimiento industrial. Por un lado, el TPM "pavimenta" el camino administrativo y promueve el cambio cultural sentando las bases para una gestión sistemática de las prácticas; por otro, el RCM ofrece fundamentos técnicos sólidos para encontrar las tareas más efectivas y eficientes para cada equipo y, lo que es muy importante, evita hacer tareas innecesarias.*

7.5 Herramientas de Mejora

7.5.1 Metodología Six SIGMA

- *Para aplicar esta metodología es preciso contar con un profundo compromiso de la más alta dirección de la organización. Sin su apoyo permanente, y sin un interés por los resultados, cualquier proyecto Six Sigma desvanece.*

- *Escogido un proceso, el objetivo es mejorarlo hasta lograr un nivel o valores de optimización factibles. Es fundamental que el dueño del proyecto identifique al dueño del proceso (process owner) de manera que pueda entender sus necesidades, inquietudes y posibilidades. Se miden variables de entrada y salida y se busca la mayor cantidad de datos para cada una. Analizadas y estudiadas dichas variables (según la relación causa - efecto), se proponen mejoras y se implementan por medio de una prueba piloto en un universo reducido del proceso. Si el resultado de la propuesta es el esperado, se replica el aprendizaje en el resto del universo escogido para su optimización.*

- *El máximo escalafón de una estructura Six Sigma esta liderado por un Director, quien es el encargado de promocionar, apoyar e incentivar el desarrollo de la metodología a nivel corporativo. En segundo lugar aparecen los dueños de los proyectos críticos (Project Champions) quienes, junto a los Master Black Belts, lideran y apoyan técnicamente a los Black Belts. A su vez, cada Black Belt lidera un grupo de mejora formado por Green Belts. Estos últimos, son los miembros del grupo y los directamente involucrados en la mejora del proceso.*

7.5.2 El Benchmarking

- *Es un proceso sistemático para comparar y evaluar productos, servicios o procedimientos de trabajo (aprender del que mejor hace las cosas). La aplicación del benchmarking en Mantenimiento, si bien es atractiva, debe hacerse con cuidado porque el contexto operativo juega un papel preponderante en la gestión de fallas. Hay quienes confunden benchmarking con copiar o replicar y, lo que es peor, exigen el mismo resultado a todo sistema productivo solamente porque es apenas similar.*

- *Un proceso de benchmarking puede aplicarse con cierto beneficioso para optimizar procedimientos operativos. Por ejemplo, un benchmarking externo no se limita sólo a evaluar los mismos productos, servicios o procedimientos; puede suceder que una organización tenga inconvenientes en su sistema de distribución de producto terminado y que ésta no sea una etapa significativa en su negocio. Lo ideal sería, entonces, estudiar sistemas logísticos de empresas líderes que se dedican exclusivamente a la distribución de productos.*

- *Para llevar adelante un proyecto de benchmarking debe definirse el alcance y los objetivos del proceso a mejorar, constituirse un equipo de trabajo con un responsable, seleccionar la empresa, sector o proceso que se usará de referencia, determinar las herramientas y los métodos de evaluación / investigación para estudiar la referencia, establecer indicadores capaces de medir objetivamente el desempeño del proceso a mejorar, seleccionar los indicadores que mejor reflejen la diferencia entre el proceso evaluado y el proceso a mejorar, identificar las prácticas que producen los mejores resultados en el proceso observado, analizar la posibilidad de asimilarlas total o parcialmente, proponer e implementar un plan de acción para llevar adelante las mejoras descubiertas.*

Capítulo 8

Administración y Programación del Mantenimiento

El mayor defecto de la planeación no es llegar a donde se propone, sino pasar más allá[1].

---

1 Duque Étienne de François (1719 - 1785).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Comprender la importancia de gestionar la información y manejar el cambio en estructuras de mantenimiento modernas.
- √ Diseñar un esquema de jerarquías y niveles para los equipos de una organización productora de bienes o servicios.
- √ Conocer las funciones más importantes de un Sistema Informático de Mantenimiento (SIM).
- √ Contar con elementos de juicio para seleccionar un SIM y participar en su implementación.
- √ Entender el proceso de programación para distintas estrategias de mantenimiento.
- √ Comprender la importancia de los documentos de mantenimiento.
- √ Participar en la elaboración y optimización de Programas Maestros de Mantenimiento.
- √ Entender el mecanismo de planificación de una Gran Reparación.
- √ Reducir los riesgos de accidentes o incidentes en una Parada de Planta.
- √ Participar en programas de prevención de accidentes y reducción del riesgo laboral.

Índice de Contenidos

8.1 Introducción

8.2 Registros de Mantenimiento
- Maestro de Equipos
- Codificación del Maestro de Equipos
- Tipos de Registros
- Gestión de la Información y Manejo del Cambio

8.3 Sistemas Informáticos de Mantenimiento (SIM)
- Módulos
- Tablas para Modos de Falla
- Programación
- Avisos de Trabajo
- Órdenes de Trabajo
- Historial
- Reportes de Mantenimiento
- Proceso de un SIM
- Relación del SIM con otras soluciones informáticas
- Selección e Implementación del SIM
- Ventajas y Desventajas de los SIM

8.4 Programación Integral y Preparación del Mantenimiento
- Procedimientos de Mantenimiento (Documentos)
- Mantenimiento Preventivo - Programación y Planificación
- Mantenimiento Condicional - Programación y Planificación
- Mantenimiento Detectivo - Programación y Planificación
- Programa Maestro de Mantenimiento
- Optimización de un Programa Maestro de Mantenimiento
- Conclusiones

8.5 Grandes Reparaciones
- Características que distinguen una Parada de Planta
- Fases de una Parada de Planta
- Seguridad en una Parada de Planta
- Calidad en una Parada de Planta

Infraestructura y Mantenimiento Edilicio

8.6 Seguridad y Mantenimiento
- Principio de Heinrich
- Situaciones Inherentemente Riesgosas
- Gestión de la Seguridad
- Procedimientos de Seguridad en Mantenimiento

Resumen de aplicación

Anexos Relacionados
- Anexo VI: Guía Práctica para estimar Criticidades
- Anexo XII: Códigos de Equipos

8.1 Introducción

Las preguntas que frecuentemente surgen en los ámbitos del Mantenimiento Industrial son, *¿cómo administrar eficientemente todo el caudal de información que demanda y genera la gestión de activos físicos*[1]*? y, ¿cómo programar y preparar las actividades de mantenimiento necesarias para garantizar el cumplimiento de las funciones de dichos activos?*

Las secciones siguientes pretenden responder estas preguntas.

1 Los Activos Físicos son los equipos (y la infraestructura) que forman parte del patrimonio de la empresa, y cuya explotación permite desarrollar la actividad productiva. Por ejemplo, para una industria química una bomba centrífuga de proceso es un activo físico; para una fábrica de bombas, la misma bomba (producto de venta) es un activo circulante.

8.2 Registros de Mantenimiento

Contar con información confiable en todo momento y, además, asegurar que se cumplan todos los procedimientos internos y externos que demanda la organización, sólo puede lograrse con un modelo de gestión de mantenimiento sencillo pero eficaz. Tal situación requiere, en muchos casos, administrar gran cantidad de equipos, ya sean estáticos, móviles o trasladables, dependiendo de sus características y del tipo de industria.

8.2.1 Maestro de Equipos

Más allá de los intentos por estandarizar el método para agrupar jerárquicamente los activos de una industria (o de cualquier otra organización), lo cierto es que no existe una única y mejor manera de hacerlo, y que además, aplique para toda actividad productiva. Esto se debe, entre otras cosas, a que la estructura para agrupar equipos en **niveles** depende del tipo de negocio.

A decir verdad, y aún habiendo modelos teóricos de referencia, cada organización (y sobre todo Mantenimiento) debe buscar la solución que mejor resuelva su situación particular. En su vida profesional el lector comprobará que todo modelo tiene ventajas y desventajas, y que una vez adoptado uno, éste tendrá virtudes pero adolecerá de algunas características que deberá salvar ingeniosamente. Algunos modelos priorizan la información técnica de los equipos, descuidando en cierta forma la administración de los gastos de mantenimiento. Otros, por el contrario hacen más hincapié en los aspectos contables del negocio en detrimento de un mejor seguimiento técnico de las labores de mantenimiento y del historial del activo a lo largo de su vida. Es necesario encontrar un equilibrio que atienda las necesidades del área de Mantenimiento en todas las facetas aceptablemente.

Como hemos dicho, y cualquiera sea el tamaño de la organización, Mantenimiento debe asegurar que se cumplan las funciones de los equipos. Para ello se hace necesario contar, en principio, con un buen **Registro, Inventario** o **Maestro de equipos**.

Un Maestro de Equipos es una lista de todos los equipos de Planta cuya estratificación en niveles deriva en lo que se conoce como *Árbol de Equipos* ó *Árbol Lógico de Equipos*. Así, un Árbol de Equipos es un arreglo que jerarquiza en niveles la nómina de los activos que están (o pueden estar) sujetos a acciones de mantenimiento y sobre los que puede imputarse gastos. Satisfacer simultáneamente estos dos aspectos (**técnico** y **contable**) hace difícil hallar una estructura arbórea y jerárquica del todo adecuada.

El primer inconveniente aparece al momento de establecer los límites para definir qué grupo de unidades funcionales serán ubicadas en cada nivel (téngase en cuenta que en el ámbito industrial se considera *equipo* tanto a un gran horno rotativo como a un variador de velocidad). Una dificultad adicional es identificar y clasificar las instalaciones (redes funcionales) que vinculan los distintos equipos como ser cañerías de agua, vapor, aire o gas, tendidos eléctricos, ductos de alimentación, etc. Estas instalaciones - con una clara identificación de sus fronteras - también hay que tenerlas en cuenta al momento de armar el Árbol de Equipos.

Para constituir el Árbol de Equipos es común adoptar como nivel superior la **Planta** o la **Unidad de Negocio**. A su vez, ésta puede estar dividida en **Sectores Productivos** cuya característica contable es que cada uno pertenece, casi siempre, al mismo **Centro de Costo**.

Un Centro de Costo es una ubicación (centro) contable que recibe gastos. Así, los términos Sector y Centro de Costo están fuertemente ligados. Esta solución resulta útil para actividades industriales cuyos equipos (mayormente estáticos) están aglomerados en sitios operativos. Para actividades cuyos activos están dispersos o se mueven a lo largo de grandes extensiones (por ejemplo, equipos móviles), el nivel *Sector Productivo* puede reemplazarse por *Tipo de Máquina*, *Tipo de Actividad*, o *Zona Geográfica de Actividad*. De igual forma, los equipos dentro de cada uno de estos rubros, seguramente imputarán gastos a un mismo centro de costo.

Finalmente, para que el Sector Productivo cumpla con sus objetivos se vale de **Unidades Operativas, Equipos** y **Componentes** según ilustra la figura 8.2.1.

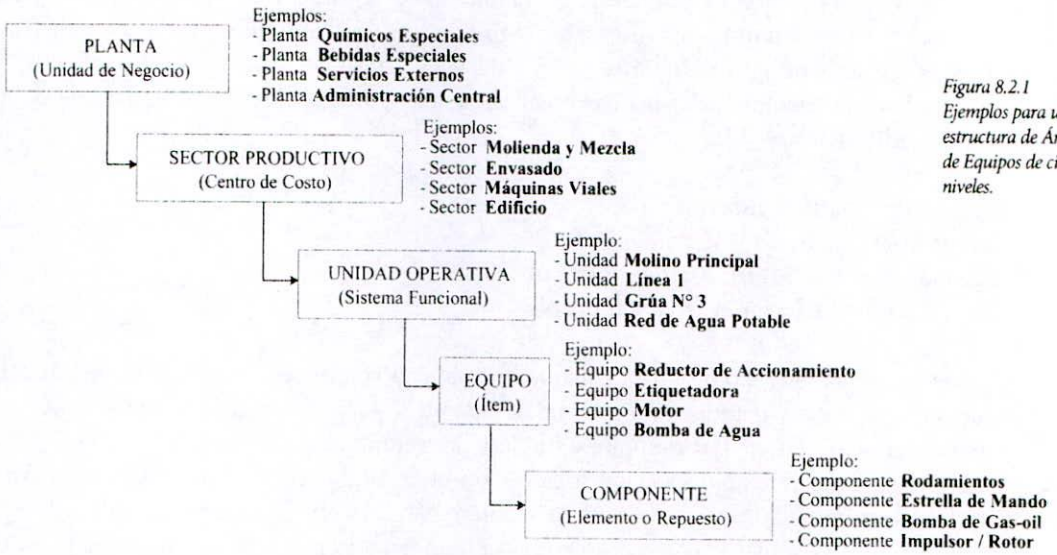


Figura 8.2.1
Ejemplos para una estructura de Árbol de Equipos de cinco niveles.

Una Unidad Operativa es un conjunto de Equipos (Ítems[1]) vinculados físicamente para cumplir una función primaria bien definida. La característica más importante de una Unidad Operativa es que el fallo de cualquiera de sus Equipos generalmente afecta su operación. Por ejemplo, una línea de envasado de bebidas tiene como función primaria llenar botellas de cierto tamaño y formato, a cierto régimen de marcha y bajo ciertas normas de calidad. Los Equipos ubicados en la línea "cuelgan" de ella en la estructura jerárquica y su disposición serie hace que la falla de cualquiera de ellos afecte las prestaciones de toda la línea.

Por debajo de los Equipos encontramos los Componentes. Un Componente es la unidad que la empresa adopta como *indivisible* desde un punto de vista técnico y económico. Dependiendo del nivel de apertura escogido, puede ocurrir que un mismo ítem sea considerado como Equipo o como Componente (Elemento o Repuesto[2]) bajo distintas circunstancias. Por ejemplo, algunos modelos funcionales de gestión consideran a los motores eléctricos como Equipos si se les hace un seguimiento técnico especial y si se reparan al fallar; o bien como Componentes, si sólo se sustituyen al fallar. Incluso, hay quienes llaman Equipo a los motores eléctricos si la potencia supera cierto valor, clasificando al resto como Componentes.

Otro criterio válido es llamar Componentes a los ítems que sólo prestan servicio a un único Equipo; mientras que si el ítem atiende a más de un Equipo, se considera como otro Equipo. Por ejemplo, si un sistema de lubricación con cañerías, bomba, válvulas, distribuidores, etc., sólo lubrica los cojinetes de un único Molino, podría ser un Componente. Por el contrario, si el mismo sistema de lubricación tiene como función principal lubricar varios Molinos (donde cada uno es un Equipo) entonces se tomaría como Equipo en sí mismo y las partes mencionadas (bomba, válvulas, distribuidores, etc.) serían sus Componentes[3].

La solución de 5 niveles propuesta en la figura anterior no es necesariamente la única posible. En ocasiones es suficiente con plantear una estructura de tres niveles: PLANTA - SECTOR PRODUCTIVO - EQUIPO ó bien, PLANTA - EQUIPO - COMPONENTE.

En función de la apertura técnica y contable deseada, y del grado de dependencia funcional entre activos, podrán adoptarse más o menos niveles en el árbol jerárquico.

---

1 Algunos autores utilizan el termino ***Ítem Mantenible*** *para referirse al nivel* ***Equipo*** *propuesto en la figura 8.2.1.*

2 En el Capítulo 9 "Gestión de Repuestos" se aborda con profundidad la problemática de los Repuestos.

3 El concepto de este último párrafo está basado en el libro "Organización y Gestión Integral de Mantenimiento" de Santiago García Garrido, página 9. Ver referencia bibliográfica.

8.2.2 Codificación del Maestro de Equipos

Definida la cantidad de niveles que se usarán para constituir el Árbol de Equipos, hay que establecer un criterio para codificar lógicamente cada equipo. El sistema numérico o **Sistema de Codificación** es una potestad que tiene la empresa y podrá escoger el que más se ajuste a sus necesidades, siempre que dicho criterio sea el mismo en todos los casos. Hay empresas que prefieren una combinación de letras y números para armar un **Código Inteligente**.

Si tomamos el primer ejemplo de cada nivel mostrado en la figura 8.2.1, podría adoptarse la siguiente secuencia de codificación.

Planta **QE**: *Químicos Especiales*
Sector **2101**: *Molienda y Mezcla*
Unidad Operativa **ML01**: *Molino Principal*
Equipo **RE01**: *Reductor de Accionamiento*

El reductor que acciona el molino principal queda codificado entonces con **QE-2101-ML01-RE01**. En un esquema como éste, y para los niveles *Unidad Operativa* y *Equipo*, se utiliza una letra (o par de letras[1]) y un número correlativo. Por ejemplo, si hubiese dos reductores activos en la Unidad Operativa **QE-2101-ML01**, el código de identificación lógico para el segundo reductor sería **QE-2101-ML01-RE02**. Esta clase de numeración permite reconocer el ítem con la simple lectura de su código.

Obsérvese que a cada activo le corresponde un código formado por una secuencia de posiciones lógicas. Cada posición lógica hace referencia a un nivel en el Árbol de Equipos y el código completo es el que se vuelca en el Sistema Informático de Mantenimiento (SIM).

Se llama **posición lógica** o de **proceso** a la ubicación usada para representar una función específica en la Planta. La posición QE-2102-ML01 es la posición de proceso en la que debe haber instalado una unidad funcional cuya función es moler producto bajo ciertas condiciones.

Como complemento de esta clase de codificación, y cuando el grado de rotación de los activos es elevado, puede usarse el esquema de **activo físico**. Además de las posiciones lógicas del árbol jerárquico ya mencionado, se dan de alta con una letra y un número, algunos activos físicos de importancia (factibles de rotar) que los convierte en no fungibles.

El número asignado a cada equipo permanece con él durante toda su vida productiva y no se altera aunque éste sea movido a otra posición lógica. Dicha identificación se materializa por medio de una placa adherida sobre su estructura en alguna parte visible.

Retomando el ejemplo anterior, sabemos que en la posición lógica QE-2102-ML01-RE01 debe existir físicamente un reductor cuyo número de **activo físico** podría ser, por ejemplo, G014[2] (ver figura 8.2.2). En el Maestro de Equipos habrá dadas de alta tanto posiciones lógicas como físicas. El árbol de equipos debe reflejar que en la posición lógica mencionada se encuentra ubicado (en ese momento) un reductor cuya identificación física es G014. Si por cualquier motivo el activo desocupa la ubicación lógica y en su lugar se instala otro, entonces el árbol deberá reflejar dicho cambio.

De igual forma, en la posición lógica **QE-2102-ML01-ME01** podría ubicarse el motor eléctrico **M075**. Sin embargo, y tal vez por su baja rotación, el Molino Principal podría no requerir un activo físico.

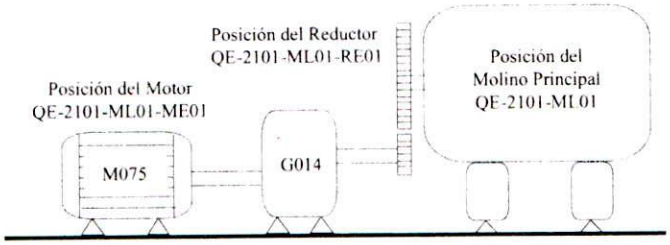


Figura 8.2.2 Esquema de ubicaciones lógicas y físicas para activos de alta rotación.

1 Ver Anexo XII "Códigos de Equipos".
2 Algunas empresas adoptan la letra G (del ingles Gear) para identificar a los reductores.

Si bien los sistemas informáticos actuales (SIM) permiten, con cierta facilidad, reubicar y seguir los activos físicos conforme van cambiando de posición, no debe omitirse **hacer** los cambios porque, de lo contrario, el árbol de equipos quedará desactualizado con el tiempo y perderá confiabilidad.

Un esquema de doble registro (posiciones lógicas y físicas) se aplica solamente en equipos que rotan por varias ubicaciones y que están bajo tareas de restauración (rebobinado de motores, reparación de bombas y reductores, etc.). También si se trata de elementos costosos a los que vale la pena hacerles un seguimiento individual de sus gastos operativos.

No obstante, resulta bastante difícil resolver con este esquema la imputación de gastos por posición lógica y centro de costo (ver Nota del apartado 8.3.5).

Existen argumentos en contra de la utilización de Códigos Inteligentes. Se plantea que no son necesarios dado que los SIM actuales son capaces de manejar gran cantidad de campos en los que es posible hacer referencia a las posiciones lógicas y físicas que desee el usuario. Asignando sólo números correlativos a cada activo, todos los datos restantes se ubican en campos específicos. Dada la potencia de búsqueda que hoy tienen los SIM, el usuario puede filtrar por cualquier campo (o grupo de campos). Esto brinda la posibilidad de hacer filtros y listar equipos de acuerdo a infinidad de criterios (por posición lógica o física, por tipo de equipo, por centro de costo, por sector, por unidad operativa, o por cualquier parámetro que se desee).

Aunque los números correlativos de codificación no aportan ninguna información acerca del equipo, la **codificación correlativa** (también llamada **auto-numérica**) evita diseñar complejos sistemas alfanuméricos que hacen casi imposible hacer cualquier modificación en el futuro como, por ejemplo, incorporar nuevos niveles en el árbol jerárquico, agregar nuevas clases de equipos, cambiar la estructura de posiciones lógicas o físicas, etc.

Podemos concluir que las ventajas de emplear una codificación correlativa (no inteligente) son que requiere poca cantidad de dígitos y que cualquier cambio estructural del sistema (SIM) puede hacerlo el usuario sin alterar la trazabilidad o provocar conflictos de integridad. Téngase en cuenta que la codificación correlativa no impide almacenar cualquier tipo de estructura jerárquica de equipos; sólo que el registro se ubica en campos fácilmente modificables.

8.2.3 Tipos de Registros

Mantenimiento debe reportar y administrar datos de manera consiste para obtener información confiable que permita tomar decisiones acertadas. Ahora bien, *¿qué datos tener registrados en el sistema?, ¿cuáles reportar? y, ¿con qué grado de rigurosidad?*

En principio digamos que existen dos tipos de registros; los **registros de administración**, también llamados **registros duros**, y los **registros de uso** o de **reporte**. Por ejemplo, el Árbol Lógico de Equipos es un registro duro, normalmente sólo modificable por los administradores del sistema. También se consideran registros duros los datos técnicos de los equipos, la lista de elementos y repuestos por equipo y los datos comerciales y de fabricación, entre otros.

Los registro de uso, en cambio, son los que reportan o modifican los usuarios del sistema de gestión cotidianamente (o los sistemas automáticos de registración). Son registros de uso, el historial técnico, las horas de marcha, los gastos por mano de obra, las fallas (según algún criterio de codificación para los *modos de falla*), los repuestos utilizados en cada intervención, las detenciones imprevistas, los trabajos programados, el contenido de las órdenes de trabajo (OT), el libro de guardia, la lista de pedidos correctivos, etc.[1].

Los registros de administración almacenan datos que generalmente no varían durante toda la vida del equipo (excepto si sufren algún rediseño). Por el contrario, los registros de uso son tablas acumulativas que albergan datos generados durante la explotación y mantenimiento del activo.

Algunos autores como John M. Moubray apuntan que pocas veces es conveniente destinar mucho tiempo y recursos en profundos relevamientos de los datos de Planta (registros de administración) dado que *"esta información es básicamente pasiva. El tenerla registrada no mejora directamente la realización*

---

1 La norma internacional ISO 14224 especifica los lineamientos para registrar datos de confiabilidad y eventos de mantenimiento de equipos pertenecientes a la industria del petróleo y sus derivados.

del Mantenimiento". Y agrega, *"las verdaderas mejoras en la eficacia del mantenimiento provienen de una definición acertada de los requisitos de mantenimiento y la cuidadosa organización de los recursos precisos para cumplirlos..."*.

En lo que respecta a los datos de uso podemos agregar que el grado de rigurosidad al momento de reportarlos debe ser cuidadosamente analizado.

8.2.4 Gestión de la Información y Manejo del Cambio

La gestión correcta de la información no es una cuestión informática sino filosófica. Se cree que sólo por ser los sistemas informáticos de mantenimiento (SIM) capaces de manejar velozmente gran cantidad de datos, vale la pena registrar y almacenar *todo*. Es decir, *cuantos más datos se registran mejor*. Esta falsa creencia surge de confundir *datos* con *información*, tema ya discutido en la sección 2.2.2 del Capítulo 2 y en el apartado 7.4.4.7 del Capítulo 7. Muchas empresas destinan gran cantidad de recursos en almacenar datos que no usan casi nunca.

Una lista completa con todos los modos de fallas de un equipo, es un conjunto de datos; si la misma lista establece, por ejemplo, cuáles de ellos provocan las peores consecuencias en la cadena productiva, entonces esos datos se transforman en información.

El departamento de mantenimiento debe estudiar y establecer cuidadosamente qué datos se registrarán con rigurosidad y cuáles no. En la medida de lo posible conviene que el SIM se nutra de los datos automáticamente (reporte de fallas de los sistemas de control, contadores de horas de marcha, reporte de fallas sintomáticas por monitoreos predictivos en línea, imputación automática de gastos al pagar facturas, etc.). La idea es que todo fluya naturalmente y que el personal registre manualmente pocos datos. Esto minimiza los errores y el aburrimiento por realizar tareas de bajo valor agregado.

Excederse en la registración no aporta ningún beneficio. La información justa en el momento justo es más rentable. Ningún reporte es útil para tomar decisiones si los registros son incompletos o erróneos; es preferible información acotada pero de alta confiabilidad.

Un adecuado manejo (o control) de **cambios** es indispensable para contar con información confiable (ver sección 7.1.2 Capítulo 7). Por *manejo del cambio* se entienden todas aquellas acciones administrativas que deben realizarse para que cualquier modificación de los activos de Planta (o su contexto operativo) se vea reflejada inmediatamente y sin errores u omisiones en los sistemas de gestión de mantenimiento. Si los equipos sufren alteraciones en sus diseños, si cambian las variables de proceso, si hay nuevos estándares de funcionamiento, etc.; entonces, probablemente estemos obligados a modificar los registros de administración. Por ejemplo, y como hemos visto en el Capítulo 7, cualquier modificación del activo o de su contexto operativo, puede alterar su Plan de Mantenimiento. De la misma forma para los casos en que exista un esquema de posiciones lógicas y físicas, el traslado de un activo a otra ubicación modificará el Árbol de Equipos.

En el manejo del cambio es verdaderamente apropiado invertir recursos. Las consecuencias con que nos podemos enfrentar si la información está descontrolada, son gravísimas. Las Oficinas Técnicas de Mantenimiento son las responsables por administrar los cambios y debe proveérselas de los recursos necesarios para cumplir su función.

8.3 Sistemas Informáticos de Mantenimiento (SIM)

Las soluciones informáticas facilitan el logro de los objetivos descriptos con anterioridad porque agilizan sustancialmente el manejo de los datos. Un SIM (ó CMMS - Computerized Maintenance Management System) es una gran base de datos que almacena registros y puede mostrarlos de forma particular gracias a funciones específicas e interdependientes que posee. Ciertos algoritmos le permiten programar acciones de mantenimiento a gran velocidad. Hoy en día, estos sistemas cuentan con potentes herramientas de búsqueda y mejoraron sustancialmente en la generación de reportes; cosa que hasta hace poco tiempo no resolvían satisfactoriamente. La capacidad de generar reportes (propiedad que afecta directamente la calidad de la *información*) es clave al momento de seleccionar un SIM[1].

Su utilización, casi imprescindible en la actualidad, exime a los miembros de la organización de efectuar tareas de bajo valor agregado, dejando más tiempo para el análisis. La información compilada facilita la confección de rutinas y acelera los procesos de mejora. La programación y preparación del trabajo es más eficiente con menos horas-hombre administrativas. Hay organizaciones que prefieren un SIM diseñado a su medida (generalmente empresas de menor envergadura); la mayoría, en cambio, opta por paquetes informáticos estándares que proveen empresas dedicadas exclusivamente al diseño e instalación de estas soluciones. No obstante, y siendo que el mercado de las pequeñas y medianas empresas (PYME) no es algo despreciable, algunos proveedores están ofreciendo versiones para atender este segmento.

En cualquier caso, y aunque todo SIM deba tener una impronta contable, es recomendable que ésta no sea la prioridad dado que los aspectos técnicos serán subestimados.

8.3.1 Módulos

Los SIM más comercializados se dividen en *módulos* y éstos, ocasionalmente, en *sub-módulos*. Un módulo es una parte del sistema que se encarga de administrar información específica. El módulo *Equipos*, por ejemplo, es la puerta de ingreso que tiene el usuario para acceder a información sensible del activo (ubicación en el árbol lógico de equipos, datos técnicos, datos comerciales, tipo de máquina, régimen de marcha, lista de elementos y repuestos, manuales, planos y esquemas, etc.). Siendo que el módulo *Equipos* se compone de registros duros, la mayoría de los usuarios deberían tener solamente acceso a lectura; reservando la potestad de modificar registros, sólo algunos pocos perfiles como el *Administrador*.

Un reporte típico de Datos de Equipo debe contener, por lo menos, la información mostrada en la figura siguiente.

Datos de Equipo - G014	
Datos de Cabecera	
Código (ID): G014	Fabricante: FLENDER
Ubicación: QE-2101-ML01-RE01	N° de Serie: 02345
Nombre: Reductor Molino Ppal.	Fecha de alta: 23/11/1997
Datos Técnicos	
Tipo de Equipo: Reductor	Velocidad Salida: 12,97 rpm
Modelo: H4SH 18B	Esquema: PLANO RE-FLE-014
Potencia: 127 kW	Motor: Siemens 80/120/985/1485
Carga lubricante: 300 litros	Lubricante: Klubersynth GEM 460
Velocidad Entrada: 1670 rpm	Peso: 6200 Kg
Datos Comerciales	
Fecha de Compra: 13/06/1997	Precio de Compra: U$S 124.000
N° de Solicitud de Compra: P435678	Fecha de entrega: 02/11/1997
N° Órden de Compra: 723456	N° de Proveedor: F-0123

Figura 8.3.1. Reporte típico de Datos de Equipo.

La mayoría de los SIM ofrecen otros módulos como *Historial, Análisis de Fallas, Programación, Personal, Inventarios (Repuestos), Herramientas, Costos, Gestión, Rutas de Lubricación, Rutas de Inspección, Predictivos, Avisos (Pedidos) de Trabajo, Compras, Abastecimiento*, etc. Le resultará fácil al lector imaginar la finalidad de cada uno.

---

1 Lourival Augusto Tavares refiere: "Existe la seguridad que más del 50% de los sistemas comercializados no llegan a satisfacer adecuadamente a las empresas...", de su libro "Administración Moderna del Mantenimiento" Capítulo 2, página 7.

Haremos hincapié, sin embargo, en aquellos módulos (y sus tablas[1]) a los que no siempre se les presta la importancia que merecen, aún siendo fundamentales para una gestión efectiva.

8.3.2 Tablas para Modos de Falla

Como vimos en el Capítulo 7 (sección 7.2), el enemigo de Mantenimiento son los modos de falla. Sabemos que existe una fuerte relación entre el activo (equipo) y sus modos de falla. Pocas empresas reparan en esto y no encaran la codificación de los modos de falla.

Recordemos, en principio, que un modo de falla es la causa raíz capaz de afectar la función (o funciones) de un equipo. Por tanto, los equipos solamente fallan a través de sus modos de falla. Pero los equipos se arman con componentes sobre los que efectivamente ocurren los modos de falla. Por tanto, las razones por las que un equipo deja de cumplir sus funciones es la suma de los modos de falla de los componentes que lo constituyen. Resulta necesario, entonces, evaluar la forma de gestionar los modos de falla en un SIM[2].

El apartado 8.2.2 mencionó que los Equipos están constituidos por Componentes. Si el Árbol de Equipos no se codifica hasta el nivel Componente (es lo más común), la vinculación *Equipo - Componentes* se hace a través de las siguientes dos tablas. Una es la tabla **Equipos**, cuyos campos sirven para registrar información relacionada con el activo como muestra la figura 8.3.1. La otra, es la tabla **Componentes**, cuyos campos pueden contener datos técnicos e información vinculada al propio componente (código de fabricación, código de compra, tipo, cantidad, descripción, etc.). La vinculación de las dos tablas es por medio de un campo clave (presente en ambas) que generalmente es el *Código de Equipo* (Posición Lógica o Física). La relación entre las dos tablas evita almacenar una gran cantidad de registros y permite armar listados de componentes para cualquier Equipo dado de alta en el SIM.

La misma relación lógica es posible entre la tabla **Equipos** y la tabla **Modos de Falla**. Los campos de esta última serán, por lo menos, un *componente* y un *descriptor de falla* (participio pasivo o adjetivo según el apartado 7.2.4.4 del Capítulo 7). La vinculación entre ambas también puede realizarse a través del campo clave *código de equipo*. El resultado es una lista de modos de falla para cada equipo.

Para el caso del reductor ilustrado en la figura 8.2.2 (G014), un modo de falla posible es "*lubricante* (componente) *insuficiente* (descriptor de falla)". Cada equipo tendrá asociada una lista de modos de falla que se irá construyendo conforme avancen los estudios de RCM, los análisis de falla (RCA) o cualquier otra técnica. También con el histórico de fallas.

COMPONENTES	
#	Descripción
01	Alarma
02	Bastidor
03	Brida
04	Cajera porta rodamiento
05	Eje
06	Empaquetadura
07	Impulsor
08	Lubricante
09	Luz
10	Motor
11	Rodamientos
12	Sensor
13	Termocupla
14	Tornillos
15	Válvula

+

DESCRIPTORES	
#	Descripción
01	Ajustado
02	Atascado
03	Contaminado
04	Corroído
05	Cortado
06	Desajustado
07	Doblado
08	Engranado
09	Erosionado
10	Gastado
11	Quemado
12	Sucio
13	Suelto
14	Torcido
15	Trabado

=

MODOS DE FALLA	
#	Descripción
01	Bastidor sucio
02	Brida suelta
03	Eje doblado
04	Empaquetadura gastada
05	Impulsor corroído
06	Impulsor desgastado
07	Luz quemada
08	Motor quemado
09	Rodamiento engranado
10	Rodamiento suelto
11	Sensor sucio
12	Sensor torcido
13	Termocupla sucia
14	Tornillos sueltos
15	Válvula trabada

Figura 8.3.2. Tablas para generar Modos de Falla.

La tabla **Modos de Falla** brinda datos uniformes para describir la avería de cualquier Equipo o Unidad Operativa. Si personal de operaciones desea solicitar a Mantenimiento la reparación de un Equipo o informar acerca de una anomalía, puede ingresar al módulo Avisos de Trabajo y escoger el componente del equipo y un descriptor de falla.

---

*1 Los sistemas informáticos operan con **tablas** y **campos**. Una tabla es una lista codificada de registros constituida por una serie de campos. Se recomienda al lector consultar bibliografía especializada en programación de sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) y CMMS (Computerized Maintenance Management Systems).*

2 Los SIM pueden administrar modos de falla y tareas de mantenimiento; sin embargo, sólo las técnicas de análisis como las estudiadas en el Capítulo 7 son capaces de identificar modos de falla y proponer tareas (rutinas) efectivas para evitar o minimizar sus consecuencias. Un SIM solamente puede administrar velozmente la táctica y la estrategia diseñadas por el hombre.

Luego, cuando Mantenimiento diagnostica el problema reportado por producción, podrá cambiar el modo de falla y ajustarlo al evento realmente ocurrido. De esta forma, la Órden de Trabajo[1] (OT) correspondiente al Aviso hará referencia al modo de falla verdadero. Cuando los modos de falla están bien codificados se establece una relación lógica entre el funcionamiento del equipo y sus averías. El módulo Historial también debe estar vinculado con la tabla modos de falla. Con el tiempo, se conocerán los modos de falla que sufrió el activo y se sabrá si las tareas de mantenimiento están siendo efectivas. Los reportes de averías deben mostrar la contribución que cada modo de falla hace al mal desempeño del equipo, lo que podría ayudar al emprenden planes de mejora.

No confundir la tabla **Modos de Falla** con la tabla **Motivos de Detenciones**. Ocasionalmente se confeccionan tablas para reportar las detenciones de equipos relevantes; sin embargo, nada tienen que ver éstas con las verdaderas causas que provocan sus detenciones.

8.3.3 Programación

Este módulo administra los Planes de Mantenimiento programados para cada activo. Funciones internas y automáticas calculan la fecha de próxima ejecución para cada tarea de acuerdo a parámetros predefinidos. El sistema emite alertas cuando hay trabajos pendientes de ejecución y, si el técnico planificador lo desea, se emite la OT correspondiente.

Es muy importante comprender la importancia de este módulo. Todas las acciones **pro-activas** de mantenimiento se administran desde aquí. Cualquier modificación que sufra el Plan de Mantenimiento del equipo, obligará a modificar algún parámetro de los registros. Los Planes, y por consiguiente las rutinas programadas que se generan a través de la OT, deben incluir los procedimientos o instructivos para efectuar la tarea, las herramientas, la lista de piezas, repuestos o materiales, entre otras cosas. Gran parte de la información cargada en el Plan, pasa automáticamente a la OT al momento de ser emitida.

El área responsable de programar los Planes en el sistema debe estandarizar la forma de referirse a cada acción posible de mantenimiento. Las siguientes definiciones pueden servir de referencia para redactar las tareas de mantenimiento.

√ **Revisar**. Examinar un sistema a través de desarme, medición o evaluación indirecta.
√ **Inspeccionar**. Reconocer técnicamente el estado paramétrico de un equipo o sistema.
√ **Verificar**. Comprobar objetivamente el estado de un equipo o componente.
√ **Controlar**. Medir las variables de estado (funcionamiento) de un ítem mantenible.

8.3.4 Avisos de Trabajo

Todo sistema de mantenimiento debe permitir que se puedan canalizar las necesidades de las áreas productivas (solicitudes de reparación correctivas).

El módulo Avisos (o Pedidos) de Trabajo presenta al usuario un formulario de diálogo que se completa al momento de hacer la solicitud de reparación. Se selecciona un Equipo o Unidad Operativa y sobre éste se confecciona el Aviso. Lo importante es que el sistema permita hacer referencia a la anomalía o a los síntomas percibidos por el emisor. El emisor debe contar con la posibilidad de efectuar una descripción libre y detallada del suceso observado. Sin embargo, y para evitar que cada persona describa las fallas como mejor le parece, ciertos modelos hacen obligatorio el campo *Modo de Falla* para la emisión de los Avisos de Trabajo.

Aunque suele ser un punto emblemático, el Aviso de Trabajo debe indicar la prioridad con la que Mantenimiento tiene que encarar el trabajo. Ver tabla 6.2.1 de la sección 6.2.3, Capítulo 6.

8.3.5 Órdenes de Trabajo

El corazón de la Gestión de Activos es la Órden de Trabajo (OT). Una OT contiene información técnica y contable de importancia. Describe claramente las tareas a efectuar y, si existen, debe incluir procedimientos de trabajo, normas, técnicas de inspección predictivas, detectivas, etc.

---

1 Ver apartado 8.3.5.

Una OT puede ser Reactiva o Pro-activa, dependiendo de su procedencia. Si proviene de un Aviso de Trabajo emitido desde el área de producción, probablemente se convierta en una OT Correctiva; por el contrario, si se emite automáticamente desde un Plan Programado será muy seguramente una OT Proa-activa (Preventiva, Predictiva, Detectiva, Mejorativa, etc.).

La mayor parte de la información manejada por el área de mantenimiento se centraliza y canaliza a través de las OT. Con ayuda del módulo *Gestión* pueden emitirse reportes de gastos por Equipo, Sector, grupo de OT's, especialidad, centro de costo, tipo de gasto (mano de obra, materiales, servicios, etc.).

La información que debe contener una OT se divide en tres rubros.

Datos de Cabecera

√ Número de la OT (generalmente correlativo).
√ Código y descripción del Equipo sobre el que se efectuará el trabajo.
√ Unidad Operativa o Sector al que pertenece el Equipo (Ubicación).
√ Fecha de Emisión de la OT, Centro de Costo y Sector de Planta.
√ Especialidad y Tipo de OT (Correctiva, Emergencia, Preventiva, Predictiva, Detectiva, Mejorativa, Calibración, Lubricación, etc.).
√ Tipo de funcionamiento del Equipo (continuo, intermitente, cíclico, etc.).

Datos Centrales o de Trabajo

√ Descripción general o Título del trabajo.
√ Código y descripción de cada tarea (en su lugar puede contener documentos asociados[1]). Es el Plan de Mantenimiento o el Trabajo Programado para el activo.
√ Fecha estimada de inicio y de finalización.
√ Nombre de los especialistas que intervendrán.
√ Repuestos, materiales o insumos que presumiblemente se usarán (código y cantidad).
√ Instructivo / Procedimiento de trabajo asociado (si existen) con su tiempo de ejecución.
√ Precauciones de Seguridad y Medio Ambiente.
√ Firma de los responsables de efectuar y supervisar el trabajo.

Datos de Gestión (Contables y Técnicos)

Aunque los datos contables no siempre quedan constituidos hasta que la OT se termina o cierra, son de utilidad para la confección de reportes.

√ Descripción (Historial) de los hechos más relevantes durante la intervención.
√ Respuesta a cada una de las tareas realizadas conforme al Plan.
√ Tiempo total de ejecución y cantidad de horas hombre insumidas por especialidad.
√ Detalle de los servicios de terceros.
√ Código y cantidad de los repuestos efectivamente utilizados.
√ Otros datos de interés asociados a la Orden de Trabajo.

La figura 8.3.3 muestra dos modelos característicos de OT.

1 Ver figura 2.3.1 del Capítulo 2.

EMPRESA	Página:
	Órden de Trabajo N°:
	Trabajo Programado N°:

Datos de Cabecera

Fecha de emisión:	Centro de Costo:
Especialidad:	Sector:
Activo Físico:	Elemento a intervenir:
N° de Serie:	Frecuencia de la tarea:
Ubicación:	Condición:

Datos de Trabajo

Descripción del Trabajo:	Riesgos Potenciales y EPP:
Procedimiento/s:	Fecha Programada de inicio:

Tareas / Especialistas

N° Tarea	Descripción de la tarea	Especialista	Hs Previstas	Respuesta
# 1				
# 2				
# 3				
# 4				
# 5				
# 6				

Lista de Materiales

Código	Descripción del material	Cantidad	UM

Lista de Herramientas

Código	Descripción de la herramienta	Cantidad	UM

Firma Responsable de Producción:	Firma Responsable Seguridad:
Firma Supervisor de Mantenimiento:	

Página:

EMPRESA

Departamento de Mantenimiento

Órden de Trabajo:

Taller:		Equipo:	
Ubicación:		Sector:	
Descripción del Equipo:		Criticidad:	
Emisión:	Requirente:	Inicio:	Fin:
Centro de Costo:		Fecha emitida:	
Permiso de Seguridad (Sí/No):	Motivo:	Prioridad:	
Descripción del Trabajo:		Elementos Protección Personal (EPP):	
Firma Seguridad / Permiso de Trabajo	Firma Jefe Sector	Firma Resposable Ejecución	

Tareas / Especialistas

N° Tarea	Descripción de la tarea	Especialista	Código de Respuesta
1			
2			
3			
4			
5			

Repuestos y Materiales

Código	Descripción	Cantidad	UM

Lista de Herramientas

Código	Descripción	Cantidad

Observaciones:

Fecha: / / Hora:

Responsable ejecución:

Aprobación Requirente	Aprobación Mantenimiento
Firma:	Firma:
Fecha: / /	Fecha: / /

Figura 8.3.3
Modelos típicos de OT[1].

Todos los SIM se diseñan para que la OT cumpla un circuito (propio del modelo funcional de la empresa) en el que va pasando por distintos estados. Generalmente la OT nace como *emitida* y finaliza como *terminada* o *liquidada*; pasando por estados intermedios como *abierta, liberada, notificada, terminada, cerrada, etc.* Es común reservar el último estado - por ejemplo, *liquidada* - para impedir que se puedan seguir imputando gastos de mantenimiento.

NOTA: En un esquema de doble posición (**lógica** y **física**), el modelo funcional escogido para gestionar los activos y, por consiguiente, el sistema informático (SIM) que lo soporta, deben resolver la siguiente complejidad: Cuando un activo es intervenido, tanto con acciones reactivas como pro-activas, el historial técnico de dichas intervenciones (resultado de las inspecciones, defectos encontrados, tareas realizadas, piezas reemplazadas, etc.) debe quedar vinculado a él. Sin embargo, los gastos que se generan a causa de la intervención o reparación, deben imputarse a la posición que ocupaba durante la

1 La última de las OT está basada en el modelo propuesto por el sistema informático MANTEC®.

operación o, por lo menos, al centro de costo. Vale decir, la posición lógica es la responsable de causar los gastos de mantenimiento. Tomemos, por ejemplo, el reductor de la figura 8.2.2. Supóngase que el mismo ha dejado de cumplir su función principal y fue necesario reemplazarlo por otro en buen estado. El activo que se retiró - G014 - es preciso repararlo. Si la OT (correctiva) se emite a la posición **lógica** QE-2102-ML01-RE01, el reporte técnico de la reparación quedará en ésta y no en el activo **físico** (G014), lo que es deseable desde el punto de vista técnico según se discutió con anterioridad. Si, por el contrario, la OT se emite sobre el activo **físico**, entonces los gastos que genera la reparación quedarán imputados al activo y no a la posición **lógica** que hizo usufructo del buen funcionamiento del activo.

Esta dificultad puede salvarse si el SIM maneja la función de Centro de Costo "flotante". Los sistemas que cuentan con esta capacidad adjudican automáticamente, a los activos **físicos**, el centro de costo de la última posición que ocuparon. De esta forma, y aunque el activo físico haya sido retirado de su posición lógica, los gastos que ocasiona su reparación se imputarán al centro de costo que hizo uso de las funciones del activo. Así, emitiendo la OT al activo **físico** se satisfacen ambos requerimientos (historial técnico e imputación correcta de gastos).

8.3.6 Historial

El módulo Historial se nutre de diversas fuentes. Hacen su aporte el cierre de las Órdenes de Trabajo, el Libro de Guardia, el registro de fallas y los ingresos directos por eventos puntuales. También pueden alimentar el Historial los Análisis de Falla.

Si bien el Historial de un equipo es importante, el registro de fallas suele estar dogmatizado. Hay una tendencia casi fanática a registrar cualquier evento ocurrido durante la explotación y mantenimiento de los activos[1]. Expresiones como *"no contamos con suficiente historial..., sin historial no es posible hacer mantenimiento..., el historial de fallas es imprescindible para diseñar el plan de mantenimiento de un equipo..."*, se escuchan a diario. Por tal motivo aún se destinan recursos "caros" en ingresar datos al registro de fallas.

Sin embargo, el registro de fallas de un equipo sólo es útil en la medida que se cumplan dos condiciones. La primera, es que sea estrictamente **necesario** saber cuántas veces falló. La segunda, es que el registro de fallas provea **información** y sea **confiable**. La condición de *necesidad* es la más importante de las dos. Los Capítulos anteriores permiten intuir que no todos los registros de fallas son igualmente importantes. De poco servirá registrar rigurosamente los fallos (modos de falla) de una válvula cuyo plan de mantenimiento sugiere que sea sustituida ante cada avería si las consecuencias de dicho fallo tienen mínimo impacto desfavorable. Se asume que, a lo largo de un período de tiempo considerable, será más rentable dejar que la válvula falle que intentar evitarlo. Se podría argumentar al respecto que es necesario, de todas formas, saber la cantidad de fallas que tuvo para implementar un plan de mejora efectivo. Sin embargo, poca gente vinculada a la empresa desconocerá que la válvula falla reiteradamente. La intuición, en este caso, predomina por sobre los cálculos rigurosos. En qué cambiarían las cosas si la válvula falla en un año, por ejemplo 20 o 25 veces. En cualquier caso se trataría de un problema a resolver en lo inmediato.

Si, por el contrario, se trata de un equipo cuyas fallas provocan consecuencias graves para la seguridad (o el medio ambiente), *¡será preferible no abultar el histórico de fallas!* Es de esperar, para estos casos, pocos registros de falla pues, sucedida una, se habrán tomado las medidas necesarias para impedir su recurrencia.

La condición de *necesidad* para equipos cuyas fallas provocan graves consecuencias, también se explica a través del acertijo de Resnikoff que menciona John M. Moubray en la página 256 de su libro Reliability-centred Maintenance (RCM). *"La adquisición de la información considerada como de suma necesidad por los que diseñan la política de mantenimiento - información sobre las fallas críticas - es en principio inaceptable y es evidencia de la falla del programa de mantenimiento. Esto es porque las fallas críticas causan pérdidas potenciales (en algunos casos ciertas) de vidas, pero no hay tasa de pérdida de vida que sea aceptable para ninguna organización como precio de la información de fallas a ser usada para el diseño de una política de mantenimiento. De este modo, el diseñador de políticas de mantenimiento se enfrenta con el problema de crear un sistema para el que "la pérdida de vidas esperada" durante la vida operacional planeada para el activo sea menor a 1 (uno). Esto significa que, en la práctica y como principio, la política debe ser diseñada sin usar datos experimentales que surgirían de las fallas que se desean evitar".*

---

[1] Al respecto ver últimos párrafos del apartado 7.2.3.3, Capítulo 7.

Vale decir que, si para evitar que sucedan fallas con graves consecuencias **necesitamos** del *histórico (o registro) de fallas*, pues claramente estamos en un verdadero problema.

Asumiendo que la condición de necesidad se cumple (es necesario contar con un registro de fallas); la segunda condición asegura que el registro de fallas brinde *información confiable*. Un registro de fallas puede convertirse en información si efectivamente enumera los modos de falla ocurridos en el equipo. Muchos registros hacen referencia únicamente a los síntomas de falla, problemas varios, efectos de una falla, anécdotas de reparaciones, comentarios generales, etc. Lamentablemente tales registros dificultan la posibilidad de obtener información confiable que sea de utilidad para evitar la recurrencia de los modos de falla. El registro de fallas – cuya confiabilidad depende de la tabla modos de falla – es uno de los puntos a los que debe destinarse más tiempo durante el diseño del modelo funcional.

8.3.7 Reportes de Mantenimiento

Otro módulo muy importante es aquel cuyas funciones facilitan la gestión de activos por medio de la generación de **Reportes de Mantenimiento**. Los altos mandos de las empresas (incluyendo la Gerencia o Jefatura de Mantenimiento) precisan reportes **simples** y rápidos. La generación de cualquier reporte no debería llevar más de 15 minutos y deben evitarse los reportes con gran cantidad de indicadores. Ver más detalles en la sección 12.4 "Tableros de Control de Mantenimiento" Capítulo 12. Los reportes deben ser parametrizables por el usuario o por un administrador designado, de acuerdo a un estándar definido por la organización. Es habitual observar en reuniones de gestión, cómo distintos sectores de una misma Planta presentan la misma información de formas diferentes.

Cada organización debe escoger un set de reportes confiables (incluso con la posibilidad de abrirlos descendentemente) que le permita tener una rápida visión global de su gestión. Reportes de Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad, Gastos, Presupuesto, Tiempos de Reparación, MTTR, etc., son algunos de los más importantes.

8.3.8 Proceso de un SIM

En términos generales podemos resumir el Proceso Integral del sistema de gestión de activos, según el diagrama que muestra la figura 8.3.4.

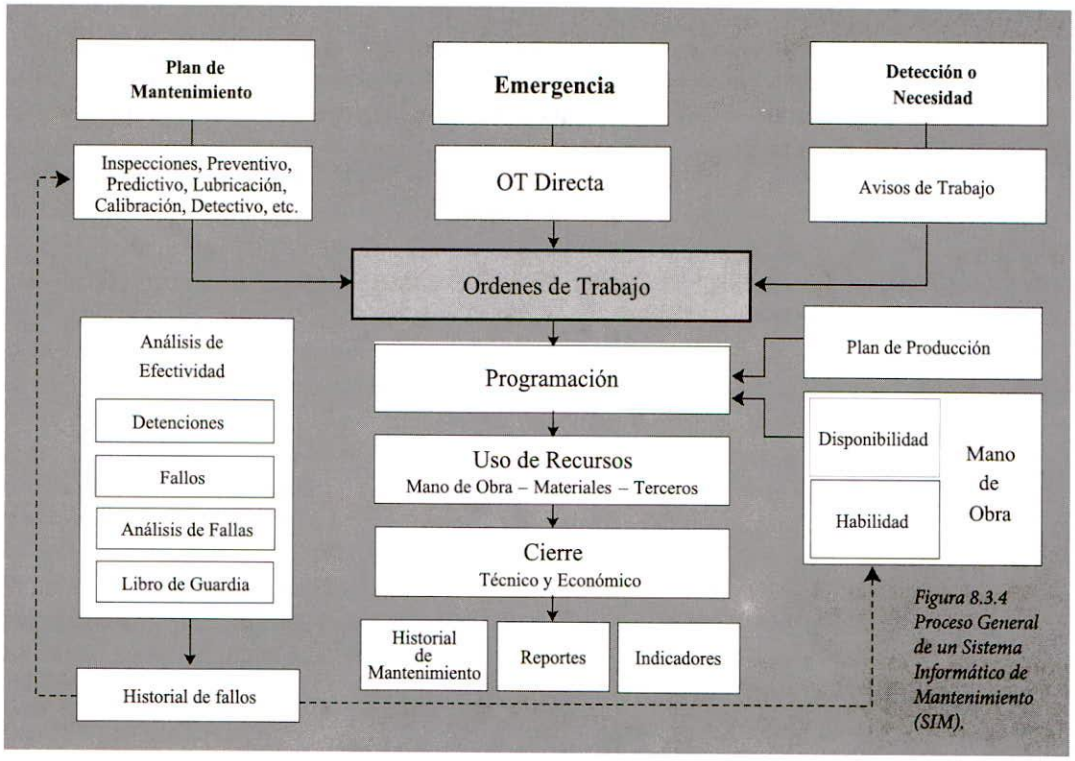


Figura 8.3.4 Proceso General de un Sistema Informático de Mantenimiento (SIM).

8.3.9 Relación del SIM con otras soluciones informáticas

El sistema de mantenimiento debe estar integrado con las demás soluciones informáticas que tenga la organización por medio de interfases. Por lo general no sucede así, y se presentan serias dificultades de gestión y pérdidas de tiempo. Un caso emblemático suele ser la relación entre el SIM y el Sistema de Compras.

Los sistemas de mantenimiento cuentan con un módulo destinado a la administración de Repuestos, utilizado por personal de Almacenes[1]. Por su parte, el departamento de Compras tendrá alguna herramienta para comprar los insumos, materias primas, materiales y servicios que demanda el negocio. Si ambas soluciones informáticas no están totalmente integradas, el personal de Almacenes tendrá que llevar una gestión casi "manual" para solicitar la compra de repuestos. Para evitar pérdidas de tiempo y errores, el SIM debe transformar automáticamente las necesidades de repuestos surgidas de los análisis de faltantes, en solicitudes de compra. Luego, un circuito de autorizaciones validará dichas necesidades.

Una situación similar ocurre con los Sistemas de Planificación y Control de la Producción. Es común que el departamento de Producción maneje valores de Disponibilidad diferentes a los que tiene el departamento de Mantenimiento. Esto se debe a que la fuente de registración es distinta porque los sistemas no están integrados. Los reportes (e indicadores) de Disponibilidad del área de Operaciones y Mantenimiento deben coincidir completamente. El departamento de Mantenimiento debe conocer exactamente la disponibilidad de los equipos que gestiona.

Otro punto importante es la vinculación del SIM con el sistema contable y financiero. La primera diferencia aparece en los gastos de mantenimiento. Mientras el SIM valoriza las acciones de mantenimiento mediante las OT's, el sistema contable seguramente hará lo propio mediante el sistema de compras y pago a proveedores. Si bien las diferencias no deberían ser grandes, es preciso que los gastos - en ambos sistemas - coincidan lo más posible.

El aspecto económico y financiero del negocio se maneja con el sistema contable y debe ser preciso, mientras que los gastos de mantenimiento en el SIM son importantes para tomar decisiones técnicas y optimizar el funcionamiento de los equipos. De acuerdo al modelo funcional de la empresa, los reportes de gastos (de mantenimiento) pueden provenir de fuentes distintas dependiendo del objetivo del reporte. Cuando se requieren indicadores globales o totalizadores, tal vez es más conveniente basarse en el sistema contable; cuando se requieren indicadores de gastos por Equipo o Unidad Operativa, puede convenir apoyarse en el SIM.

El mayor inconveniente se presenta en la administración del presupuesto de mantenimiento. En este punto los sistemas deben estar integrados. El SIM debe permitir hacer comparaciones entre el presupuesto y el gasto real incurrido en el período considerado. Además, los Trabajos Programados (rutinas pro-activas) deben estar valorizados para hacer previsiones de gastos.

8.3.10 Selección e Implementación del SIM

Antes de elegir el sistema informático de mantenimiento, debe analizarse el modelo funcional vigente en la organización para comprender qué necesita la empresa. El modelo funcional de una empresa - representable por medio de diagramas de bloques, diagramas de flujo, esquemas u otras herramientas - es un proceso que describe funciones, requerimientos y responsabilidades de las distintas áreas, la relación que hay entre ellas y la secuencia de las operaciones desarrolladas en cada una. El modelo funcional debe ser conocido y aceptado por todos los miembros de la organización. Habitualmente se busca que el nuevo sistema se adapte al modelo existente. No obstante, la implementación del SIM puede ser la oportunidad para que la compañía haga las mejoras que considere adecuadas.

Los siguientes son algunos ejemplos de la información que debe proveer la descripción del modelo funcional: *cantidad de niveles que conformará el árbol de equipos, usuarios del sistema y sus grados de responsabilidad (Supervisión, Administración, Operación, Jefatura y Gerencia), tipos de Órdenes de Trabajo, estados por los que pasarán los Avisos y las Órdenes de Trabajo, circuito de aprobación (workflow) para Vales de Repuestos y Órdenes de Trabajo, documentación obligatoria (tarjetas de desconexión de equipos, formularios, permisos de trabajo, certificados de calibración), tipos de unidades de marcha de los equipos, tipos de Planes de Mantenimiento*, etc.

---

1 Ver Capítulo 9 "Gestión de Repuestos".

Una vez acordado el modelo funcional, deben evaluarse las ofertas del mercado analizando las bondades, limitaciones, costos y alcances de cada una. Hay que estimar también las obligaciones a futuro; esto es, recursos para administrar y mantener el sistema (incluyendo el soporte técnico del proveedor), el hardware requerido, los sistemas de comunicación, etc. La selección del paquete informático es una tarea en conjunto; participan responsables de mantenimiento, informática, comunicaciones, recursos humanos y finanzas. Puede resultar útil que participen especialistas externos (no necesariamente pertenecientes a las empresas oferentes). Es muy importante que los responsables de seleccionar el SIM participen también de su implementación. La realidad muestra que generalmente la compra del sistema es una decisión "de política empresarial" que toma ligeramente muchos aspectos técnicos. Si los referentes de las áreas mencionadas forman parte de ambos grupos de trabajo (selección e implementación) se obtienen los máximos beneficios.

Aunque hoy los SIM son necesarios, no debemos creer que su implementación solucionará todos los problemas de la gestión de activos. Un SIM facilita la administración del modelo funcional y soporta los registros de mantenimiento que define la compañía.

La implementación del sistema informático debe transitar las siguientes etapas:

√ *Armar una estructura sólida de liderazgo comprometida con la implementación.* La figura 8.3.5 muestra un ejemplo de organización en la que se resalta el papel central del Grupo Núcleo. Sus miembros deben ser especialistas de mantenimiento, compras y finanzas. Si la compañía posee varias unidades de negocio (Plantas), muy alejadas entre sí, es conveniente designar un Referente Técnico para cada una. Esta persona actuará de interlocutor entre su Planta y el Grupo Núcleo. El apoyo del departamento de Sistemas es imprescindible en todas las fases de implementación.

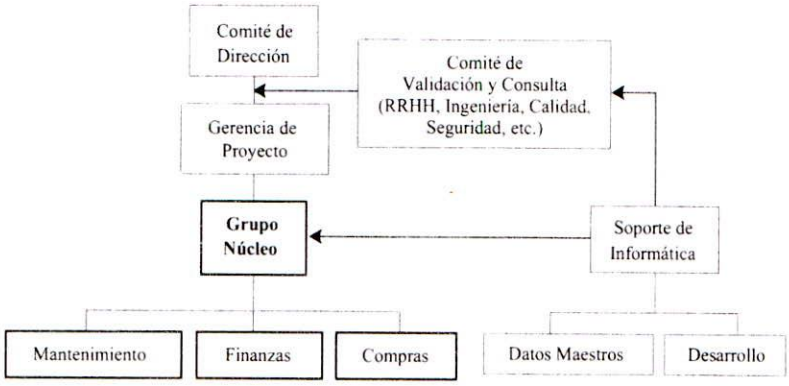


Figura 8.3.5 Estructura Orgánica de Implementación.

√ *Confeccionar, aprobar por la Dirección y publicar un cronograma del proyecto.* Además de concatenar en el tiempo las etapas más importantes del proyecto, el cronograma de implementación debe indicar qué se esperará al concluir cada etapa.

√ *Poner en evidencia las diferencias entre las capacidades del producto y las necesidades del cliente.* En raras ocasiones la solución informática escogida satisface por completo el modelo funcional vigente. Por lo tanto, en conjunto con el proveedor, deben medirse las diferencias (gap's) que hay entre la oferta y las necesidades de la empresa.

√ *Arribar a una solución equilibrada para manejar las diferencias.* Si bien el nuevo producto debe satisfacer las necesidades del cliente, una presión excesiva sobre todos los requerimientos suele ser contraproducente. Ocurre en ocasiones que la versión estándar del producto no satisface algún punto del modelo y se le pide al proveedor que haga alteraciones en el programa. Si dichas modificaciones son demasiado profundas, en el futuro pueden aparecer errores de funcionamiento. Hay que procurar la máxima adaptación del sistema en su versión estándar, lo que pone en evidencia la necesidad de ser certeros en la etapa de Selección.

√ *Diseñar el modelo detallado.* En esta etapa se analizan puntualmente los grandes rubros definidos en el diseño funcional. Se establece la estructura de todos los módulo (Avisos de Trabajo, Historial, OT's, Planes de Mantenimiento, etc.).

√ *Preparar los Datos Maestros y armar los programas de migración.* Tanto para el caso de implementar un nuevo SIM como en el caso de un cambio de producto, debe hacerse una migración prolija y completa de **todos** los registros (datos) existentes.

√ *Realizar una corrida de prueba (testing) antes de entrar en productivo.* Este punto es muy importante y se recurre a usuarios claves para que verifiquen el funcionamiento de todos los módulos.

√ *Capacitar a los usuarios.* Normalmente se aplica la capacitación llamada de *dos niveles.* Un primer nivel de capacitación fuerte para los usuarios claves y administradores del sistema se realiza en las primeras fases del proyecto. En la segunda etapa de formación, los usuarios claves replican sus habilidades al resto de los operadores en el mismo lugar de trabajo. Se conoce como método "*train the trainers*[1]".

√ *Migrar la totalidad de los datos y efectuar los lanzamientos escalonadamente.* Los lanzamientos (*Kick-off*) de las distintas unidades de negocio deben ser escalonados para evitar errores masivos e incorporar el aprendizaje de los lanzamientos anteriores.

√ *Hacer los ajustes necesarios en productivo.* El grupo de implementación debe acompañar a los usuarios durante algún tiempo posterior al lanzamiento para hacer los ajustes que sean necesarios en régimen productivo.

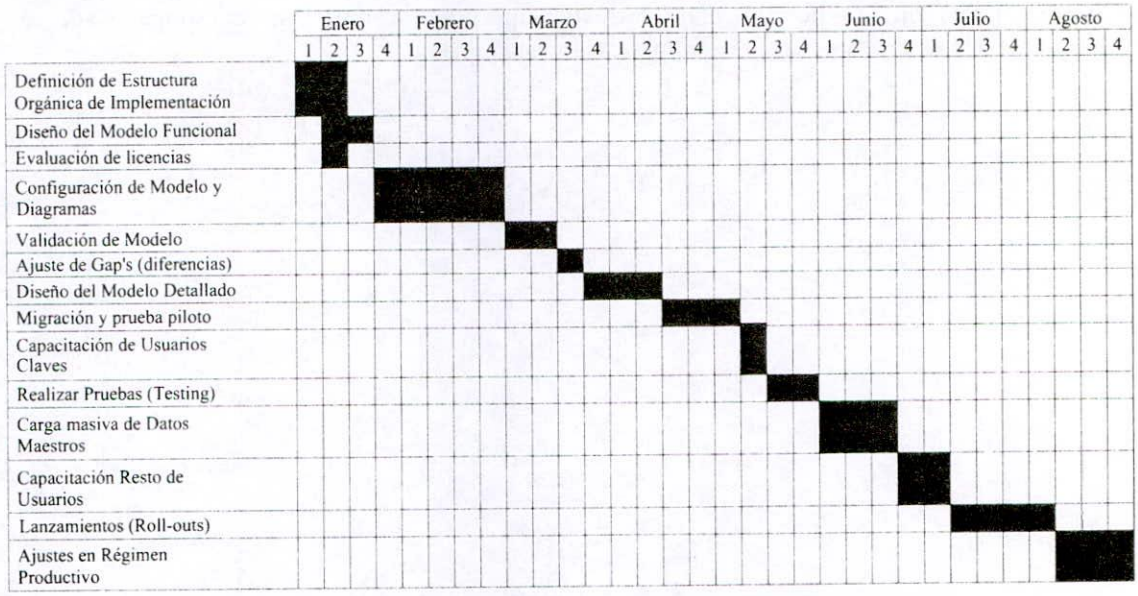


Figura 8.3.6
Ejemplo de un Cronograma de Implementación.

8.3.11 Ventajas y Desventajas de los SIM

Un SIM correctamente implementado y con todas sus funcionalidades operativas, permite:

√ Controlar y reducir gastos de mantenimiento.
√ Aumentar la Confiabilidad y Disponibilidad de Equipos y Unidades Operativas.
√ Aumentar la eficiencia y rentabilidad de Planta.

---

1 Formación de formadores.

- √ Reducir el tiempo destinado a cuestiones administrativas (mejor uso del factor humano) y utilizarlo en tareas de mayor riqueza y motivación. Un SIM, por ejemplo, agrega mucho valor al trabajo de los analistas de Mantenimiento (Programadores).
- √ Planificar y programar tareas pro-activas y reactivas.
- √ Confeccionar y administrar las Órdenes de Trabajo con mayor rapidez y exactitud.
- √ Acceder fácilmente a registros de historial, datos técnicos y gastos de mantenimiento.
- √ Intercambiar datos automáticamente con otros sistemas.
- √ Garantizar la disponibilidad de repuestos y, a su vez, reducir los stocks inmovilizados.
- √ Hacer previsiones de gastos y proyección de presupuestos.
- √ Crear reportes e informes centralizados y estandarizados.
- √ Proveer datos para impulsar planes de mejora y acciones de benchmarking.
- √ Administrar formularios (certificados de calibración, permisos de trabajo, etc.).
- √ Facilitar el manejo del cambio a través de funciones de alerta internas que evitan las *violaciones de integridad referencial*[1].

No es de esperar desventajas; no obstante, la falta de profundidad en algunos puntos del proyecto y/o una interpretación equivocada de algunos conceptos, pueden provocar los siguientes inconvenientes:

- √ Desaprovechar la capacidad que inherentemente tiene la solución.
- √ Erogar grandes sumas de dinero, sin el consecuente retorno de la inversión.
- √ Replicar planes de mantenimiento en forma masiva y automática para equipos "similares". Las consecuencias de estas prácticas fueron ya discutidas en reiteradas oportunidades.
- √ Adaptar el modelo funcional de la organización a las capacidades del sistema, obteniendo un modelo funcional de peores características a las reinantes antes de la implantación.
- √ Si las interfases con otras herramientas informáticas que posee la empresa no son simples y adecuadas, el manejo de los datos se vuelve complicado y no confiable.

1 Estos programas detectan si un dato maestro es alterado sólo en una parte (campo de una tabla), alertando a los usuarios que dicha acción puede violar la relación conforme de ese dato con los demás módulos del sistema.

8.4 Programación Integral y Preparación del Mantenimiento

El departamento de Mantenimiento debe programar y preparar diferentes tipos de tareas; las que no se organizan todas de la misma forma. Un mismo equipo puede estar sujeto a un gran número de tareas distintas. Por ejemplo, un sistema de bombeo podrá requerir la sustitución cíclica de alguna pieza, el análisis predictivo de rodamientos, una búsqueda de fallas ocultas en sus seguridades, inspecciones dinámicas en operación, lubricación de algún elemento rotante, e incluso una rápida reparación cuando se rompe. Si consideramos, además, que un sector productivo puede incluir varios activos, entonces la complejidad para organizar todas las actividades y establecer un *Programa Integral de Mantenimiento*, puede ser alta.

Para implementar un Plan de Mantenimiento hay que saber qué vamos a mantener, con qué estrategia, cómo lo vamos a hacer, y cuándo o cuál es el mejor momento para hacerlo. El qué vamos a mantener y con qué estrategia, ya lo hemos visto (Plan); del cómo y cuando lo vamos a hacer, trata la presente sección.

El esquema de la figura 8.4.1 sintetiza las actividades pro-activas que pueden recaer sobre un equipo. Cada tarea específica (con su frecuencia, ejecutantes y responsables) surgirá del análisis detallado de los modos de falla y sus consecuencias según se analizó en el Capítulo 7.

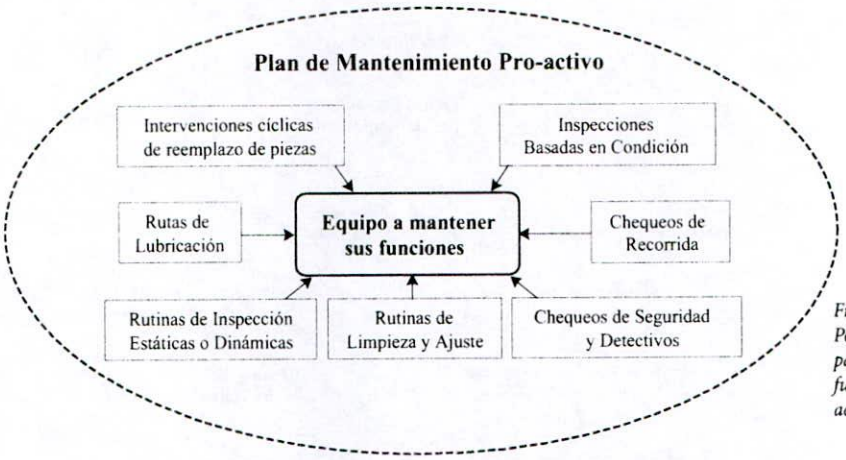


Figura 8.4.1 Posibles actividades para mantener las funciones de un activo.

La primera dificultad se presenta al intentar calendarizar simultáneamente todas las actividades de mantenimiento de un conjunto de equipos (Sector Productivo o Planta). Las tareas tendrán frecuencias de ejecución variadas; desde aquellas medidas en días hasta las que se miden en años. Aún en un mismo entorno de frecuencias puede haber mucha disparidad entre ellas. Por tanto, los encargados de la programación deberán ajustar inteligentemente, y en la medida de lo posible, algunas frecuencias para que el programa sea técnica y administrativamente posible. Además, el Programa (o conjunto de Trabajos Programados) de un equipo puede contener tareas que obliguen a detener su marcha, tareas de inspección a planificar sólo con el equipo en funcionamiento, tareas que efectúen especialistas externos, tareas a realizar por personal de operaciones (Mantenimiento Autónomo), tareas a aprobar por la autoridad gubernamental competente, etc. Semejante abanico de actividades, a desarrollar en tiempos diferentes, debe **programarse** y **prepararse** con cuidado.

Una alternativa válida para resolver el problema es dividir la programación de acuerdo al tipo de mantenimiento (preventivo, proactivo, predictivo, detectivo, lubricación, etc.) y luego de acuerdo al rango de frecuencias (altas o bajas). Aquellas frecuencias por debajo de tres meses, por ejemplo, se consideran **altas**; las que están por encima, se asumen como **bajas**[1]. Todo esto hace que se tengan programas de alta y baja frecuencia para cada tipo de actividad.

---

*1 Dentro de las tareas de **baja frecuencia** se encuentran las Grandes Reparaciones, los Overhauls y las Paradas Mayores o Paradas de Planta (Shutdown) que se analizan en la sección 8.5.*

La **programación** del Plan Integral de Mantenimiento de todo un sector productivo consiste en ubicar cronológicamente las tareas (Plan) dentro de un horizonte temporal; la **preparación** asegura la disponibilidad de materiales y recursos para desarrollar las actividades. Tanto la programación como la preparación se fortalecen con el aporte de los sistemas informáticos (SIM) a través del uso de cronogramas y diagramas de Gantt, respectivamente.

Es tan importante la función del *programador* como la del *preparador*, aunque en muchos casos se trate de la misma persona. El programador trabaja de forma "masiva" o general ubicando los Trabajos Programados (Plan) de todos los equipos en un horizonte establecido de programación (ej.: cronograma anual) procurando una distribución más o menos equilibrada del volumen de trabajo a lo largo de dicho período; el preparador[1], por su parte, toma cada evento del programa, lo transforma en una (o más) Órden de Trabajo y organiza minuciosamente la secuencia de las tareas asegurando que los recursos estén disponibles (mano de obra y materiales) y que haya factibilidad operativa de realizarlo en función de la disponibilidad de Planta. Esta persona coordina los trabajos junto al programador de producción.

El diagrama de la figura 8.4.2 ilustra una secuencia de programación y preparación para tareas de mantenimiento pro-activo.

NOTA: En adelante, y por razones de uso extendido, se adopta el término planificación para referirse a la preparación de los trabajos.

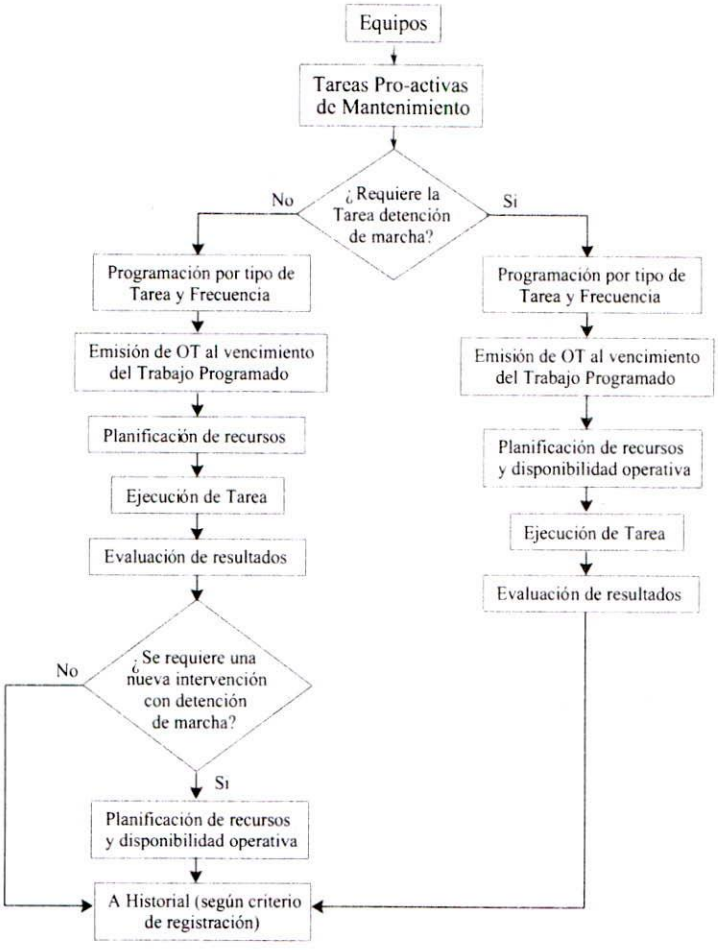


Figura 8.4.2 Secuencia de programación y planificación para actividades de mantenimiento.

El programador calendariza las actividades, de alta y baja frecuencia, con o sin detención de marcha, a realizar con personal de la empresa (mantenimiento), externo (contratistas) o de producción; atendiendo, además, lo siguiente:

---

1 En muchas organizaciones al preparador también se lo denomina ***planificador****.*

√ Distribución de los Equipos en Planta.
√ Grado de interferencia entre las distintas actividades.
√ Tiempo teórico de ejecución para cada trabajo (carga de trabajo).
√ Nivel de calificación que deben tener los operarios.
√ Calidad de los repuestos, materiales y servicios de terceros.

Antes de su vencimiento, el planificador toma cada Trabajo Programado y organiza la actividad completamente. Debe asegurar la disponibilidad de mano de obra al momento de ejecutar el trabajo, la existencia de repuestos, herramientas, materiales, instrumentos de medición, etc., y la disponibilidad de los servicios externos. Resumiendo, el planificador será el responsable de:

√ Proponer un día, turno y hora para iniciar la intervención, chequeo o inspección.
√ Preparar la zona de trabajo y coordinar con producción el inicio de los trabajos.
√ Priorizar cada trabajo cuando varias son las actividades.
√ Emitir las OT, gestionar los permisos de trabajos y las tarjetas de desconexión, preparar los procedimientos e instructivos de trabajo, etc.
√ Calcular el tiempo de la actividad (incluso hay quienes estiman el tiempo de cada tarea).
√ Designar la nómina (nombre y legajo) de los especialistas que participarán.
√ Asegurar la provisión de materiales, consumibles, repuestos, máquinas y herramientas.
√ Maximizar el cumplimiento de las normas de seguridad y calidad vigentes.

En su obra *Mantenimiento Industrial*[1], Raimundo Heber Gonzáles refiere: ... *"Puede decirse, entonces, sin lugar a cometer una exageración, que Planificación constituye el corazón de todo el sistema (lo cual no implica que sea la dependencia más importante...), por el papel que le es dado desempeñar"*.

8.4.1 Procedimientos de Mantenimiento (Documentos)

En el esquema de la figura 1.1.2 del Capítulo 1 se hizo referencia a la necesidad de contar con **procedimientos** para cumplir con el Proceso de Mantenimiento. Junto a los **instructivos**, los procedimientos son documentos útiles para gestionar y administrar acciones de mantenimiento; y en ambos casos, es requisito su documentación.

Si bien en esta parte destacamos el significado de los procedimientos y de los instructivos, bien cabe mencionar otros documentos de importancia como las normas, los manuales, las especificaciones y los registros. A continuación una breve descripción de cada uno.

√ **Norma**. Documento usado como regla o estándar para reglamentar la forma de realizar una actividad (o fabricar un producto), y cuyo cumplimiento permite lograr objetos similares o intercambiables.

√ **Manual**. Documento o libro, en forma de compendio, que enuncia lo más substancial de una materia. Por ejemplo, un manual se utiliza para establecer los principios básicos de funcionamiento de un sistema o describir las tareas de mantenimiento de un equipo y las piezas que lo constituyen. El Manual de Calidad de una organización, por su parte, es el conjunto de procedimientos que describe sus procesos.

√ **Procedimiento**. También conocido como **Protocolo**, es un documento normalizado cuya finalidad es enunciar la metodología que garantiza el cumplimiento de cierto proceso o la fabricación de cierto producto. Por ejemplo - y enmarcado en el ámbito de las normas ISO 9000 - el departamento de Mantenimiento documenta, a través de procedimientos, los procesos más importantes de su área. Un procedimiento documentado tiene sentido (es válido) si su ausencia provoca efectos adversos - directos o indirectos - en la organización que lo redacta. Un procedimiento se compone de las siguientes partes: Objetivo, Alcance, Definiciones, Responsabilidades, Desarrollo, Registros, Anexos y Documentos Relacionados.

---

1 Página 50 del título mencionado; ver más en referencia bibliográfica.

√ **Especificación**. Una especificación técnica es un documento técnico claro y conciso que sirve para indicar los parámetros correctos - y sin ambigüedades - que deben esperarse de un determinado objeto o trabajo (muy aplicada a la fabricación de productos).

√ **Registro**. Documento trazable que permite acumular datos para ratificar o dejar evidencia de alguna acción técnica o administrativa factible de ser auditada en el futuro.

√ **Instructivo**. También llamada **Instrucción Técnica**, es un documento cuya secuencia lógica de instrucciones u operaciones sirve de guía para realizar una determinada tarea (generalmente técnica), asegurando condiciones de calidad y seguridad. Cada operación, sentencia o tarea del instructivo debe ser clara, concisa y entendida por el personal que la efectuará. A través de instructivos se transmite, por ejemplo, la manera de hacer *ajustes, calibraciones, reglajes, montajes, desmontajes, regulaciones*, etc. El cumplimiento de los instructivos debe satisfacer las especificaciones.
Un instructivo evita el olvido de tareas o el uso indebido de piezas, y sirve para ajustar el tiempo de ejecución de los trabajos. Los reportes de mantenimientos evalúan la relación entre el tiempo teórico de ejecución (sugerido por el Trabajo Programado) y el tiempo real insumido para hacer el trabajo (reportado en la Órden de Trabajo cuando se cierra).
Las instrucciones de mantenimiento se capitalizan a través de las OT.

La figura 8.4.3 muestra una OT con un breve instructivo preventivo periódico.

EMPRESA			Página: 1/1
	Órden de Trabajo N°: **45678**		Trabajo Programado N°: **3**

Datos de Cabecera

Fecha de emisión: **09/07/2005**	Centro de Costo: **1215**	Especialidad: **Eléctrica**
Sector: **Distribución**	Activo Físico: **TRAFO SE-01**	Ubicación: **Zona 4**
N° de Serie: **S23123212**	Frecuencia de la tarea: **Anual**	Condición: **Normal**

Datos de Trabajo

Descripción del Trabajo: **Preventivo Transformador SE-01**	Riesgos Potenciales y EPP: **SNZ**
Procedimiento/s: **Instructivo SEPR1**	Fecha Programada de inicio: **12/07/2005**

Tareas / Especialistas

N° Tarea	Descripción de la tarea	Especialista	Hs Previstas	Respuesta
# 1	Desenergizar el Trafo según procedimiento TE-08	Eléctrico	0,5	
# 2	Controlar nivel de aceite y verificar ausencia de pérdidas. Informar al Supervisor en caso de anomalías.	Eléctrico	0,5	
# 3	Reemplazar Silica Gel	Eléctrico	0,5	
# 4	Limpiar aisladores; eliminar polvo y suciedad	Eléctrico	1	
# 5	Desobstruir canales, radiadores y ventiladores (Limpieza)	Eléctrico	1	
# 6	Verificar funcionamiento de Termostato	Eléctrico	0,25	
# 7	Simular corte por máxima temperatura	Eléctrico	0,25	
# 8	Calibrar termostatos según IT-02PL2	Eléctrico	0,5	
# 9	Simular disparo de Relé Buchholz *	Eléctrico	0,25	

Lista de Materiales

Código	Descripción del material	Cantidad	UM
56.87.786	Silicagel azul granulado	1	Kg
56.87.456	Solvente dieléctrico	0,5	lt
45.34.909	Estopa limpieza	3	bto

Lista de Herramientas

Código	Descripción de la Herramienta	Cantidad	UM
90.98.765	Pertiga descarga A.T.	1	un
90.55.564	Llave francesa 8"	1	un
90.45.234	Pincel chato de cerda 1"	1	un

Firma Responsable de Op.:	Firma Responsable Seg.:
Firma Supervisor de Mto:	

** La prueba de Relé Buchholz es una búsqueda de fallos ocultos que se incluye en esta OT Preventiva por razones de practicidad. El dispositivo de Buchholz (o de "doble flotante") montado entre la cuba y el depósito de expansión, se utiliza para producir una señal de alarma y/o desconexión del transformador en caso de acumulación de gases, pérdidas y flujo de aceite.*

Figura 8.4.3
Órden de Trabajo de una actividad de Mantenimiento Preventivo Periódico.

Un tema frecuentemente discutido, es el grado de detalle que debe tener el instructivo o cada uno de sus pasos u operaciones. El grado de detalle depende de varios factores, entre los que se encuentra la capacitación del personal, el tipo de intervención, el nivel de calidad exigido, las consecuencias de una reparación incorrecta, el nivel de riego de las tareas, etc.

Veamos, por ejemplo, dos formas posibles de describir un mismo trabajo.

√ Reemplazar Bomba Centrífuga (Tiempo estimado 2 horas).

Ó bien,

√ De acuerdo al siguiente instructivo de mantenimiento.

Reemplazo de Bomba Centrífuga. IT-03-M01				
#	*Descripción de la Tarea*	*Repuestos / Herramientas*	Observaciones	Tiempo estimado (min)
1	*Verificar la existencia de un equipo adecuado para reemplazar*		*Verificar en el SIM el stock de bombas reparadas*	*10*
2	*Confeccionar la tarjeta de desconexión eléctrica y solicitar la desconexión*		*Anotar N° de tarjeta en la OT*	*5*
3	*Desconectar eléctricamente*		*Anotar N° de OT en la tarjeta*	*10*
4	*Trasladar la bomba de reemplazo y las herramientas al lugar de trabajo*	*Caja de herramientas*	*Utilizar EPP*	*10*
5	*Cerrar válvula de agua de refrigeración y desconectar mangueras y conexiones*		*Utilizar EPP*	*3*
6	*Retirar la carcaza del acople elástico*		*Utilizar EPP*	*5*
7	*Retirar el elemento elástico del acople*		*Utilizar EPP*	
8	*Retirar los tornillos de la brida de admisión y descarga de la bomba*		*Utilizar EPP*	*15*
9	*Una vez desvinculada la bomba, aflojar los tornillos de la base y retirarlos*		*Utilizar EPP*	*15*
10	*Bajar la bomba utilizando el soporte superior y el aparejo*	*Aparejo N° 003*	*Utilizar EPP y el aparejo indicado*	*10*
11	*Subir la bomba de reemplazo con el aparejo y dejarla en posición*	*Aparejo N° 003*	*Utilizar EPP y el aparejo indicado*	*10*
12	*Limpiar con cepillo la superficie donde asientan las juntas*	*Cepillo, lija*	*Utilizar EPP*	*5*
13	*Montar las juntas en posición correcta*	*Juntas PA-200*	*Utilizar únicamente la junta mencionada.*	*2*
14	*Arrimar los bulones de la brida de impulsión*		*Utilizar EPP*	*5*
15	*Arrimar los bulones de la brida de admisión*		*Utilizar EPP*	*5*
16	*Arrimar los bulones del soporte de la bomba*		*Utilizar EPP*	*5*
17	*Apretar bulones de bridas según la secuencia de las tareas 14, 15 y 16*		*Utilizar EPP*	*5*
				120

Figura 8.4.4
Instructivo de Mantenimiento.

El primer caso solamente hace referencia a una única instrucción general (no aconsejable); mientras que el segundo, especifica puntualmente cada operación.

Muchas sentencias son de uso común para una gran cantidad de equipos. Los SIM, a través de tablas especiales en el módulo *Trabajos Programados*, permiten codificar y almacenar tareas genéricas, lo que acelera la confección de instructivos. Al momento de dar de alta un nuevo Trabajo Programado, sólo habría que escoger - de una tabla predefinida que podría llamarse, por ejemplo, *Maestro de Tareas* o *Tareas de Mantenimiento* - aquellas operaciones genéricas que aplican al equipo en cuestión y, en todo caso, ajustar únicamente el tiempo de ejecución dado que éste puede ser distinto dependiendo del equipo y su contexto operacional (o condiciones de explotación[1]). Esto evita que una misma sentencia sea descripta de distintas maneras, dificultando el proceso administrativo de gestión.

Algo similar ocurre con las denominadas *Tablas de Seguridad* o *de Riesgo*. En estas tablas se dan de alta todos los cuidados o precauciones posibles en materia de seguridad, así como los elementos de protección personal (EPP), y luego se los asocia al Trabajo Programado que lo requiera. La información sale impresa como un *Documento* Asociado junto a la OT.

Téngase en cuenta que toda intervención de mantenimiento es inherentemente peligrosa, por tanto, siempre es mejor establecer explícitamente las precauciones que deben tomarse para evitar cualquier perjuicio en la salud de las personas o en el medio ambiente.

8.4.2 Mantenimiento Preventivo - Programación y Planificación

El Mantenimiento Preventivo consiste en intervenir cíclicamente los equipos (o alguno de sus sistemas) transcurrido cierto tiempo calendario, horas de marcha, distancia recorrida, ciclos de operación u otra unidad de medida relacionada con el mecanismo de degradación. Siendo que es necesario detener la marcha de los equipos (excepto cuando se trata de Rutinas de Inspección Dinámicas), la preparación anticipada (planificación) es clave para evitar tanto pérdidas de tiempo como pérdidas económicas.

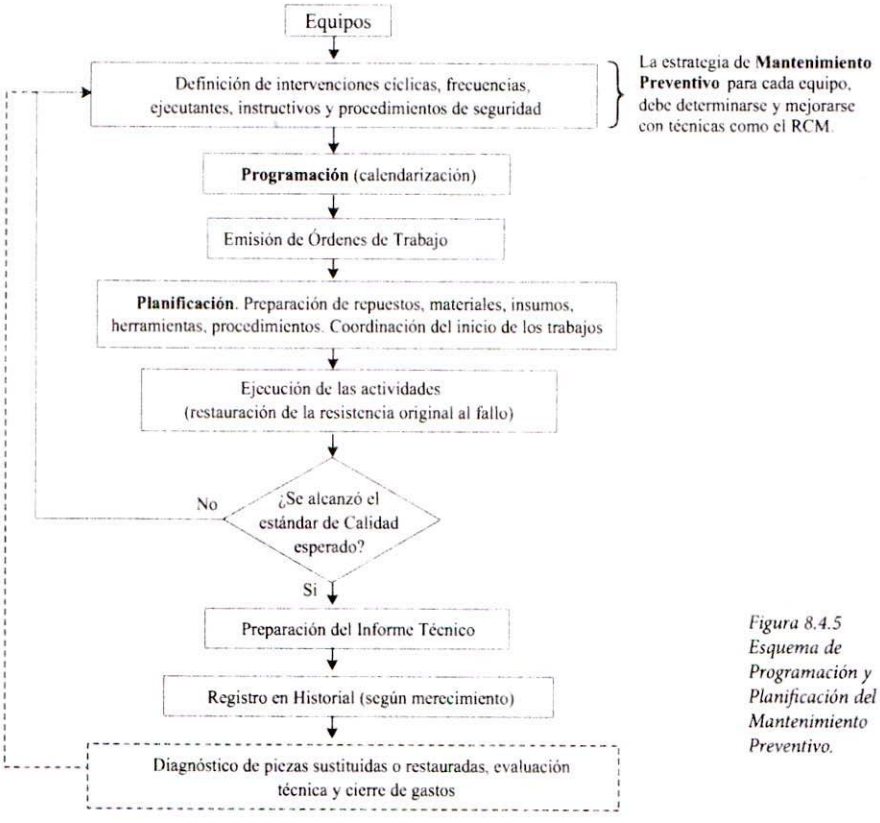


Figura 8.4.5 Esquema de Programación y Planificación del Mantenimiento Preventivo.

1 *Dentro del Contexto Operativo se encuentran las* ***condiciones de explotación****. Ver Capítulo 1 sección 1.1.1.*

El último bloque en línea de puntos de la figura anterior, resalta la necesidad de estudiar con detenimiento el estado y condición de los componentes sustituidos o restaurados al concluir los trabajos. Llama la atención la poca importancia que se le presta a esta instancia, sin pensar en el provecho que de ella puede obtenerse. Cada intervención preventiva arroja datos concretos para ratificar los patrones de falla de los componentes; cualquier dato técnico o económico servirá para ajustar la estrategia de mantenimiento que se está aplicando.

El Mantenimiento Preventivo se basa en el recambio o restauración de piezas cuyos modos de falla responden al patrón de fallas de la curva de la "bañera" (ver Capítulo 1); por tanto, hay que asegurarse que los elementos respondan efectivamente a dicho patrón. De lo contrario, se estarán sustituyendo piezas inútilmente y ocasionando gastos de mano de obra innecesarios.

Para programar un conjunto de rutinas preventivas (pertenecientes a un mismo equipo o a un grupo de equipos) es habitual basarse en múltiplos de los planes *mandantes*. Una rutina se dice mandante cuando su frecuencia no es alterable porque las consecuencias del fallo afectan la seguridad o porque el costo de su realización o el costo de las consecuencias del fallo son elevados. El resto de las rutinas (no mandantes) se ajustan a las primeras quedando como múltiplos de éstas y reduciendo su intervalo. El patrón de consolidación de rutinas más usado incluye frecuencias diarias, semanales, quincenales, mensuales, trimestrales, semestrales o anuales. También puede utilizarse el múltiplo *semanal* ajustando los intervalos a: 1 semana, 2 semanas (quincenal), 4 semanas (mensual), 13 semanas (trimestral), 26 semanas (semestral) o bien 52 semanas (anual).

La programación requiere conocer con cierta exactitud el tiempo que demanda cada tarea para distribuir equilibradamente el volumen de trabajo a lo largo del horizonte de programación. Normalmente se comienza estimando el tiempo en base a la experiencia y luego se ajusta de acuerdo a los valores reales surgidos de los informes de cierre de cada intervención y Órden de Trabajo.

Las rutinas de **alta frecuencia** – diarias, semanales, quincenales y hasta mensuales – tienen un alto grado de repetibilidad, por lo que la planificación normalmente es casi automática y está bien ajustada. Para las rutinas de baja frecuencia – menores a mensuales – es necesario planificar las tareas con suficiente antelación.

Una regla práctica puede ser la siguiente:

Tiempo previo de Planificación (Semanas)	Frecuencia de la Rutina
1	Mensual
2	Trimestral
3	Semestral
4	Anual

Figura 8.4.6 Tiempo previo de planificación de acuerdo a la envergadura de los trabajo.

La tabla anterior es sólo orientativa pues podrá haber, por ejemplo, rutinas semestrales de bajo volumen cuya planificación no necesariamente habrá que comenzar tres semanas antes. Esta tabla se refiere a rutinas en las que existe cierta relación proporcional entre la carga de trabajo y el intervalo de ejecución.

Una práctica efectiva de planificación es aquella en la que el planificador prepara los trabajos para toda la semana y entrega al Supervisor (distribuidos por día y área), los trabajos a realizar en cada jornada. Se conoce como Weekly Planning y el inicio de cada actividad se coordina junto al responsable de producción en una reunión semanal. El planificador debe procurar que se hagan la mayor cantidad de Trabajos Programados; no obstante, también debe reservar cierta fuerza laboral para efectuar trabajos que surjan de imprevisto (mantenimiento correctivo).

El registro de historial (si merece la pena), en lo posible, deben constituirlo las mismas personas que realizaron el trabajo. Hay que evitar que la información se transmita entre varias personas porque puede perderse información valiosa. Las Órdenes de Trabajo hay que notificarlas a diario conforme se van concluyendo las operaciones (salvo que el trabajo sea muy breve en cuyo caso se notifica y cierra simultáneamente). Deben registrase las horas realmente empleadas y los eventos técnicos de relevancia.

8.4.3 Mantenimiento Condicional – Programación y Planificación

Pocas dudas quedan referidas a que es el área de Ingeniería de Mantenimiento la encargada de Programar las inspecciones predictivas / proactivas surgidas del estudio de los modos de falla. Incluso en ciertas empresas, con gran cantidad de activos físicos, hay personal dedicado casi exclusivamente a gestionar fallas sintomáticas.

La responsabilidad del "área de predictivo", como suele llamársele, es muy importante. Ésta analiza **objetivamente** y con rigor científico los **síntomas** de ciertos componentes que a través de sus variables físicas irán manifestando algún deterioro. Si el diagnóstico arroja un resultado desfavorable, se coordina el momento oportuno para realizar las restauraciones que evitarán que el sistema (Equipo o Unidad Operativa) padezca una falla funcional.

El personal debe estar comprometido con los procesos de mejora continua, incorporando nuevas tecnologías que aumenten las chances de predecir síntomas de falla. El Mantenimiento Condicional tiene como objetivo final anticiparse a las fallas funcionales lo más tempranamente posible. Esto requiere un seguimiento exhaustivo de los parámetros de control (variables físicas a medir) definidos para cada punto. El mayor desafío es conocer cabalmente el mecanismo de degradación (o patrón de deterioro) de la variable física escogida, lo que demanda tiempo y esfuerzo. Si se logra, habrá muchas más posibilidades de impedir fallas funcionales.

El Mantenimiento Condicional no requiere gran planificación en comparación con el Preventivo, excepto si es necesario preparar la instalación o cuando es imposible acceder a ciertas partes del equipo en funcionamiento. No obstante, y aún en estos casos, la interrupción e invasión del sistema es mínima. La circunstancia de *baja planificación* hace que, por lo general, el mantenimiento predictivo / proactivo se ejecute en paralelo del resto de las actividades. Decimos en paralelo pero no independientemente porque los especialistas diagnosticadores de fallas sintomáticas se nutren de toda información generada por Mantenimiento. Por ejemplo, si en un componente es factible y conveniente hacer una combinación de tareas (preventivo + predictivo), el programador y el planificador de preventivo pueden apoyarse en el historial estadístico de las mediciones predictivas. De igual forma, y luego de una sustitución cíclica del componente (mantenimiento preventivo), el encargado de predictivo puede estudiar el estado del mismo y ampliar el conocimiento que tenga sobre su mecanismo de degradación.

El esquema siguiente describe el circuito de organización para el mantenimiento condicional.

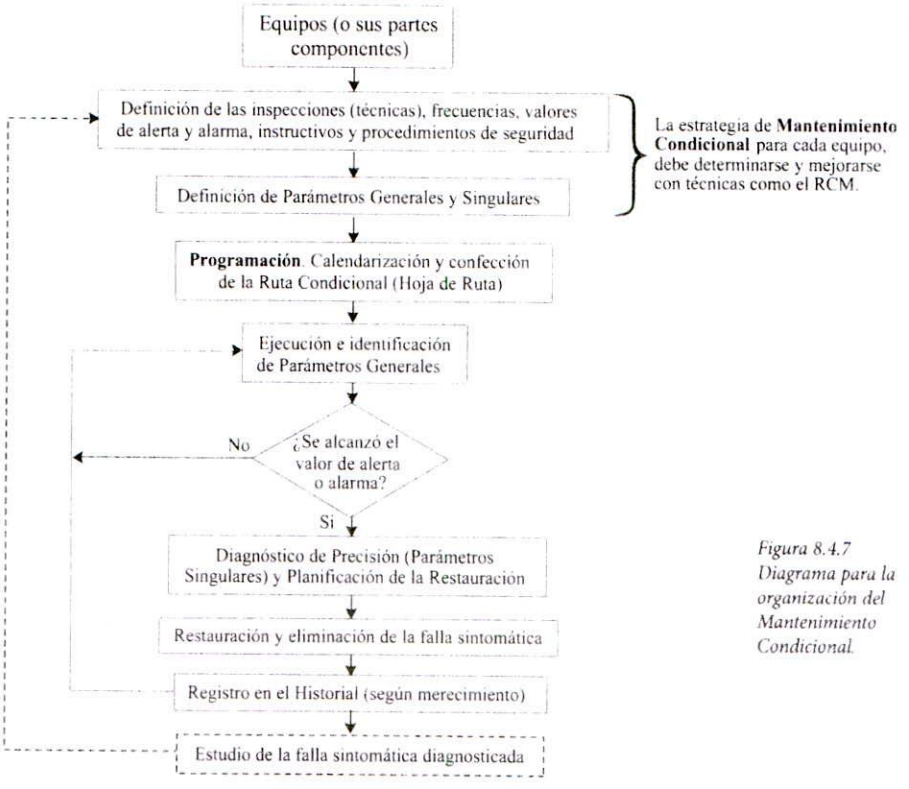


Figura 8.4.7
Diagrama para la organización del Mantenimiento Condicional.

Se observan las siguientes cuatro etapas:

√ Programación de la Ruta de Mantenimiento Condicional (según técnica de inspección)
√ Identificación de Parámetros Generales desviados
√ Diagnóstico de la falla sintomática a través de los Parámetros Singulares
√ Restauración y/o eliminación de la falla sintomática

La información necesaria para construir una Ruta Condicional (Hoja de Ruta), se sintetiza en la sección 3.1.6 del Capítulo 3. Allí se describe el significado de **parámetro general** y **singular**.

Una práctica habitual, aunque incorrecta, es comenzar haciendo una lista de equipos sobre los que "deseamos" o nos parecería "útil por su criticidad" realizar Mantenimiento a Condición, y luego aplicar indiscriminadamente alguna técnica cuya frecuencia arbitraria sea más o menos similar para todos los puntos. Si bien este proceder puede identificar, al menos por tino, algunas fallas sintomáticas, lo cierto es que únicamente un análisis riguroso de los modos de falla y sus efectos garantiza eficacia y eficiencia.

Reunidas todas las tareas a condición existentes en Planta, el paso siguiente es agruparlas por técnica predictiva / proactiva. Se obtendrá así, una lista de equipos y sus **puntos** de inspección para cada técnica (Vibraciones, Análisis de Aceites, Termografía, etc.).

Un mismo equipo puede tener más de un punto de inspección y cada punto tener más de una medición; por tanto, es preciso armar la lista (Ruta) con suficiente apertura para tener en cuenta todas las mediciones. Por ejemplo, para construir una Ruta de Análisis de Vibraciones se comienza armando la Ruta de cada Equipo según su cadena cinemática (ver figura 4.2.14 del Capítulo 4) y luego se ordenan todos los Equipos (con sus puntos de medición) según el camino más conveniente para el recolector de datos (ver figura 8.4.8)[1].

Lista de Parámetros Generales para Análisis de Vibraciones						
#	*Código del Punto*	*Posición*	*Descripción del Punto*	Variable	Valor de Alerta	Frecuencia
1	*RLL-05M6-1H*	*05M6*	*Rodamiento (lado libre) M. Eléctrico*	*Aceleración*	*0,1 G*	*30 días*
2	*RLL-05M6-RMS*	*05M6*	*Rodamiento (lado libre) M. Eléctrico*	*RMS*	*0,5 G*	*30 días*
3	*RLA-05M6-1V*	*05M6*	*Rodamiento (lado accionamiento) M. Eléctrico*	*Aceleración*	*0,1 G*	*30 días*
4	*RLA-05M6-RMS*	*05M6*	*Rodamiento (lado accionamiento) M. Eléctrico*	*RMS*	*0,5 G*	*30 días*
5	*RLR-05AH6-RMS*	*05AH6*	*Rodamiento (lado reductor) Acople Hidráulico*	*RMS*	*0,8 G*	*15 días*
6	*RLE-05G6-1V*	*05G6*	*Reductor (lado entrada)*	*Velocidad*	*0,05 mm/s [fe_c] 0,2 mm/s [2xfe_c]*	*15 días*
7	*RLE-05G6-1H*	*05G6*	*Reductor (lado entrada)*	*Velocidad*	*0,05 mm/s [fe_c] 0,2 mm/s [2xfe_c]*	*15 días*
8	*RLE-05G6-RMS*	*05G6*	*Reductor (lado entrada)*	*RMS*	*0,5 G*	*15 días*
9	*RLS-05G6-1V*	*05G6*	*Reductor (lado salida)*	*Velocidad*	*0,05 mm/s [fe_c] 0,2 mm/s [2xfe_c]*	*15 días*
10	*RLS-05G6-1H*	*05G6*	*Reductor (lado salida)*	*Velocidad*	*0,05 mm/s [fe_c] 0,2 mm/s [2xfe_c]*	*15 días*
11	*RLS-05G6-RMS*	*05G6*	*Reductor (lado salida)*	*RMS*	*0,5 G*	*15 días*
12	*CLA-05Z6-1V*	*05Z6*	*Cojinete (lado accionamiento) Molino*	*Velocidad*	*3,5 mm/s [< 6 kcpm] 1 mm/s [6 - 10 kcpm] 0,5 mm/s [> 10 kcpm]*	*30 días*
13	*CLA-05Z6-1A*	*05Z6*	*Cojinete (lado accionamiento) Molino*	*Velocidad*	*2 mm/s [< 6 kcpm] 0,7 mm/s [6 - 10 kcpm] 0,3 mm/s [> 10 kcpm]*	*30 días*
14	*CLL-05Z6-1V*	*05Z6*	*Cojinete (lado libre) Molino*	*Velocidad*	*3,5 mm/s [< 6 kcpm] 1 mm/s [6 - 10 kcpm] 0,5 mm/s [> 10 kcpm]*	*30 días*
15	*CLL-05Z6-1A*	*05Z6*	*Cojinete (lado libre) Molino*	*Velocidad*	*2 mm/s [< 6 kcpm] 0,7 mm/s [6 - 10 kcpm] 0,3 mm/s [> 10 kcpm]*	*30 días*

Figura 8.4.8
Lista de parámetros generales para una Ruta de Mantenimiento Condicional.

1 Es útil documentar con un dibujo (Plano de Hoja de Ruta) la secuencia de medición de cada Equipo en la Ruta.

- Con esta información se arman las Hojas de Rutas o los Trabajos Programados en el SIM, que luego se transformarán en una Órden de Trabajo con los puntos que hayan alcanzado la fecha teórica de ejecución (ver figura 8.4.9).

En la lista de la figura 8.4.8 se han incluido algunos valores de alerta a título de ejemplo; sin embargo, los datos correspondientes a los valores específicos de alerta y alarma habitualmente se encuentran almacenados en el propio software de diagnóstico o en los equipos recolectores de datos.

Página: 1/1

EMPRESA "XX"

Departamento de Mantenimiento

Órden de Trabajo: **65234**

Ruta de Vibraciones: **RV-101**		Sector: **Filtración**	
Descripción del Equipo: **Rotantes**		Frecuencia: **30 días**	
Emisión: **02/04/2007**	Requirente: **Ingeniería**	Inicio: **03/04/2007**	Fin: **03/04/2007**
Centro de Costo: **3405**		Fecha emitida: **02/04/2007**	
Permiso de Seguridad (Sí/No): **Si**	Motivo: **Predictivo**	Prioridad: **Normal**	
Descripción del Trabajo: **Ruta de Mantenimiento Condicional**		Elementos Protección Personal (EPP): **Zapatos de Seguridad, Anteojos y Protección Auditiva.**	
Detalle:			
Firma Responsable de Seguridad		Firma Supervisor	

#	Código del Punto	Posición	Descripción del Punto	Variable	Cód. Respuesta
1	RLL-05M6-1H	05M6	Rodamiento (lado libre) Motor Eléctrico	Aceleración	
2	RLL-05M6-RMS	05M6	Rodamiento (lado libre) Motor Eléctrico	RMS	
3	RLA-05M6-1V	05M6	Rodamiento (lado accionamiento) M. Eléctrico	Aceleración	
4	RLA-05M6-RMS	05M6	Rodamiento (lado accionamiento) M. Eléctrico	RMS	
12	CLA-05Z6-1V	05Z6	Cojinete (lado accionamiento) Molino	Velocidad	
13	CLA-05Z6-1A	05Z6	Cojinete (lado accionamiento) Molino	Velocidad	
14	CLL-05Z6-1V	05Z6	Cojinete (lado libre) Molino	Velocidad	
15	CLL-05Z6-1A	05Z6	Cojinete (lado libre) Molino	Velocidad	

Comentarios:

Parada Fecha: / / Hora: Arranque Fecha: / /
Motivo: Descripción:
Responsable de Ejecución: Observaciones:

Aprobación Requirente	Aprobación Mantenimiento
Firma: Fecha: / /	Firma: Fecha: / /

Figura 8.4.9
Órden de Trabajo para una Ruta de Mantenimiento Condicional.

Como se dijo, algunas compañías prefieren que la Órden de Trabajo sólo mencione los equipos a inspeccionar y que toda la información técnica y específica de las mediciones se administre por medio de la herramienta informática que utiliza la técnica predictiva.

Una vez *activada* la Ruta, los especialistas evalúan los resultados de las mediciones verificando la ausencia de fallas sintomáticas. De producirse el desvío de alguna variable (valor de alerta), se debe diagnosticar el síntoma. Finalmente, y si la situación potencial de la avería lo amerita, se planifica la restauración del ítem dañado para restituir su condición original.

El último bloque de la figura 8.4.7 – Estudio de la falla sintomática diagnosticada – refiere que si la falla sintomática aparece con demasiada frecuencia, al punto de convertirse en crónica, puede ser necesario impulsar un análisis de los *Principios Físicos* (P-M) para hallar los factores causales que provocan su aparición.

Nota: Es fácil caer en la tentación de alterar (reducir) la frecuencia de inspección cuando no han aparecido valores de alerta o de alarma luego de varias mediciones. Sin embargo, si el intervalo Δt_{SF} fue bien estimado para cada punto y la técnica demuestra confiabilidad, no debería cambiarse la frecuencia según la estadística de los resultados favorables, dado que dicha frecuencia no depende de cuan a menudo se manifiesta la falla sintomática. Una reducción de la frecuencia de inspección solamente se justifica si se logra un mayor conocimiento del mecanismo de degradación de la variable; vale decir, cuando se acepta que el intervalo Δt_{SF} es mayor que el antes estimado.

8.4.4 Mantenimiento Detectivo – Programación y Planificación

Tal como fue expresado con profundidad en el Capítulo 5, el Mantenimiento Detectivo consiste en identificar fallos ocultos en dispositivos redundantes o de protección. Recordemos que tales dispositivos (activos o pasivos) se instalan para disminuir la probabilidad de falla simultánea en los sistemas (Equipo + Dispositivo de Protección) que demandan alta confiabilidad. En especial, los dispositivos de protección se instalan para indicar un estado de anomalía (protección indicativa), para reducir las consecuencias de una falla (protección contensiva) o para interrumpir el funcionamiento de un equipo cuya falla podría causar serias consecuencias (protección interruptiva). Las tareas de búsqueda de fallos se programan y planifican para que los chequeos interfieran lo menos posible en la actividad productiva. De todas formas, de por sí, tienen baja interferencia.

Si bien no existe una única manera de programar estas tareas, la experiencia demuestra que la agrupación por **tipo de dispositivo** y por **rango de frecuencias**, es la más ventajosa.

En el primer caso se arma una lista de tareas para las redundancias (activas y pasivas) y otras para las protecciones interruptivas, indicativas y contensivas. Luego, y para cada uno de los grupos mencionados, se ordenan las tareas en orden ascendente o descendente según sus intervalos de ejecución. Esto posibilita visualizar las tareas que están más próximas entre sí en lo que respecta a sus frecuencias. En la búsqueda de fallos ocultos no es dañino aumentar la frecuencia de los chequeos en la medida que la propia tarea no tenga posibilidades de dejar el dispositivo fuera de servicio (ver ecuación 5.3.19 del Capítulo 5 y sus comentarios). Por lo tanto, y siempre aumentándolas, se ajustan algunas de las frecuencias para dejar dos, tres o hasta cuatro frecuencias por las que consolidar al conjunto completo. Es similar a aplicar el concepto de *frecuencia mandante* que se mencionó en la sección 8.4.2.

Finalmente, para constituir la Ruta de Mantenimiento Detectivo, queda ordenar los equipos (y sus elementos a chequear) en un dibujo o Plano de Ruta que facilite la recorrida en Planta. En la figura 8.4.10 se ilustra un ejemplo de programación de tareas detectivas.

Lista de Tareas Detectivas					
#	Equipo	Código de Elemento	Descripción de Tarea	Frecuencia Original	Frecuencia Ajustada
1	21H1	Sensor de Puerta 21H1S1	Comprobar que al abrir la puerta se detiene la cinta principal	30 días	15 días
2	21H1	Sensor de Puerta 21H1S2	Comprobar que al abrir la puerta se detiene la cinta principal	30 días	15 días
3	21H1	Sensor de Puerta 21H1S5	Comprobar que al abrir la puerta se detiene el inversor de bolsas	90 días	90 días
4	21H1	Sensor de Puerta 21H1S6	Comprobar que al abrir la puerta se detiene el elevador 21H1E1	15 días	15 días
5	21H1	Sensor de Puerta 21H1S7	Comprobar que al abrir la puerta se detiene el transporte de salida 21H1H7	90 días	90 días
6	21H1	Botón Parada Emergencia 21H1BE1	Comprobar que al accionar la Parada de Emergencia se detiene la cinta N° 1	15 días	15 días
7	21H1	Botón Parada Emergencia 21H1BE2	Comprobar que al accionar la Parada de Emergencia se detiene la cinta N° 2	15 días	15 días
8	21H1	Cordón de Emergencia 21H1CE1	Accionar el cordón de emergencia N° 1 y comprobar la detención de la cinta N°1	120 días	90 días
9	21H1	Alarma General 21H1A1	Probar el funcionamiento de la chicharra sonora del circuito de alarma general	15 días	15 días
10	21H1	Motor 21H1HM01	Medir espesor y distancia entre ferodos del motor 21H1 HM01 (P20-M1)	360 días	360 días
11	21H1	Motor 21H1HM02	Medir espesor y distancia entre ferodos del motor 21H1 HM02 (P20-M2)	360 días	360 días
12	21H1	Sensor de altura 21H1E1	Comprobar que funciona el sensor N° 1 de máxima altura del Elevador 21H1E1	90 días	90 días
13	21H1	Sensor de altura 21H1E2	Comprobar que funciona el sensor N° 2 de máxima altura del Elevador 21H1E1	90 días	90 días
14	21H1	Sensor de Cuchilla 21HC1	Comprobar que al mover la cuchilla del aplicador 21H1H14.9, acciona el sensor P93-S1	15 días	15 días
15	21H1	Microinterruptor 21H1MI1	Comprobar que al abrir la puerta entrada a Paletizadora, acciona el microinterruptor P20-S01	15 días	15 días

Figura 8.4.10
Listado de chequeos detectivos.

Una OT característica para tareas de frecuencia 15 días, se muestra en la figura siguiente.

Página: 1/1

EMPRESA "XX"
Departamento de Mantenimiento

Orden de Trabajo: **66876**

Ruta Detectivo: **RD-176** Descripción del Equipo: **21H1**		Sector: **Embolsado** Frecuencia: **15 días**	
Emisión: **18/07/2007**	Requirente: **Ingeniería**	Inicio: **21/07/2007**	Fin: **21/07/2007**
Centro de Costo: **5432**		Fecha emitida: **18/07/2007**	
Permiso de Seguridad (Sí/No): **Si**	Motivo: **Detectivo**	Prioridad: **Normal**	
Descripción del Trabajo: **Ruta de Mantenimiento Detectivo**		Elementos Protección Personal (EPP): **Zapatos de Seguridad, Anteojos y Protección Auditiva.**	
Detalle:			
Firma Responsable de Seguridad		Firma Supervisor	

#	Elemento	Tarea	Respuesta
1	Sensor de Puerta 21H1S1	Comprobar que al abrir la puerta se detiene la cinta principal	
2	Sensor de Puerta 21H1S2	Comprobar que al abrir la puerta se detiene la cinta principal	
4	Sensor de Puerta 21H1S6	Comprobar que al abrir la puerta se detiene el elevador 21H1E1	
6	Botón Parada Emergencia 21H1BE1	Comprobar que al accionar la Parada de Emergencia se detiene la cinta N° 1	
7	Botón Parada Emergencia 21H1BE2	Comprobar que al accionar la Parada de Emergencia se detiene la cinta N° 2	
9	Alarma General 21H1A1	Probar el funcionamiento de la chicharra sonora del circuito de alarma general	
14	Sensor de Cuchilla 21HC1	Comprobar que al mover la cuchilla del aplicador 21H1H14.9, acciona el sensor P93-S1	
15	Microinterruptor 21H1MI1	Comprobar que al abrir la puerta entrada a Paletizadora, acciona el microinterruptor P20-S01	

Comentarios:

Parada Fecha: / / Hora: Arranque Fecha: / /
Motivo: Descripción:
Responsable de Ejecución: Observaciones:

Aprobación Requirente	Aprobación Mantenimiento
Firma: Fecha: / /	Firma: Fecha: / /

Figura 8.4.11
Orden de Trabajo para una Ruta Quincenal de Mantenimiento Detectivo.

Las acciones detectivas a realizar sobre dispositivos redundantes, por lo general, no demandan gran planificación. Lo mismo ocurre para las protecciones contensivas. Sin embargo, en las protecciones indicativas la planificación es más compleja y aún más en las protecciones interruptivas. Estas últimas requieren mayor planificación dado que una verdadera "prueba en caliente[1]" requerirá seguramente la interrupción del sistema funcional; generalmente ésta es la única manera de asegurar que el sistema protector "interrumpe" o detiene el sistema protegido.

Muchas tareas simples de búsqueda de fallos ocultos pueden realizarlas los operadores de los equipos dada su cercanía a la máquina.

8.4.5 Programa Maestro de Mantenimiento

En un Programa Maestro de Mantenimiento no es necesario, ni tampoco conveniente, incluir planes diarios o semanales; estos generarían una cantidad desmedida de papeles. En su lugar, se opta por planillas que tienen un casillero para cada día y operación.

Si bien existe la posibilidad de entregar diariamente una OT, según se mostró en la figura 2.3.1 del Capítulo 2, se prefieren las planillas como las ilustradas en la figura 8.4.12.

1 Una "prueba en caliente" es aquella que chequea la totalidad del sistema de protección, asegurando que no quedan fallas ocultas en alguna parte del mismo.

Hoja de Inspección Dinámica

Área:	Servicios	**Fecha:**	15/03/2005	**Seguridad**	Partículas dispersas: (Protector Ocular)	Fotografía del Equipo / Línea o alguna referencia válida que ayude a realizar la Tarea.
Sector:	Generación de Vapor	**Responsable:**	CGB		Puntos calientes: (Precaución / Pirómetro óptico)	
Equipo / Línea:	Caldera N° 1	**Tiempo:**	30'		Riesgo eléctrico: (Cables, equipo con tensión)	
Tipo de Rutina:	Rutina de Inspección Dinámica	**Ejecutante:**	FGC		Zona ruidosa: (Protector Auditivo)	
Frecuencia:	Diaria				Sistemas en Movimiento: (Precaución)	

Equipo	Descripción de la Tarea	Modo	Valor esperado	Semana 1						Semana 2						Semana 3						Semana 4						Observaciones
				L	M	M	J	V	S	L	M	M	J	V	S	L	M	M	J	V	S	L	M	M	J	V	S	
Caldera N° 1	Inspeccionar el nivel de agua (en la parte superior), y verificar si se encuentra entre el valor mínimo y máximo. Dar aviso al Operador de turno en caso de anomalía.	Visual	Entre max - min																									
	Observar en el Panel de Control que las alarmas indicativas estén funcionando.	Visual	Sin rojos																							•		
	Verificar que la presión de entrada de gas a quemador sea inferior a 2,5 bar. (Parte superior).	Visual	Inferior a 2,5 bar																									
	Verificar que la temperatura de salida de vapor se encuentre entre los valores especificados. (Parte superior).	Visual	Entre 180-210 °C																									
	Registrar estado de carga. (Panel de control)	Visual																										
	Verificar y Registrar el N° de quemadores encendidos. Si es < a 2 dar aviso al Operador de turno. (Sala de control)	Visual	2																									
	Registrar la presión de salida en la bomba de purga. (Parte superior de tuberías de alimentación).	Visual																										
	Inspeccionar la bomba de purga buscando pérdidas de agua. Dar aviso al Supervisor de Mantenimiento en caso de pérdidas.	Visual	Sin pérdidas																									
	Controlar el nivel de ruido. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de anomalía.	Auditivo	Sin ruidos extraños																									
	Inspeccionar los alrededores buscando vibraciones extrañas. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de encontrarlas.	Auditivo	Sin vibraciones																									
	Verificar que el nivel de aceite de la bomba de purga se encuentre entre los niveles especificados. Dar aviso al Supervisor en caso de anomalía	Visual	Entre marca y máx.																									
	Registrar la temperatura exterior del motor de la bomba. Dar aviso a Mantenimiento si es > al valor indicado.	Pirómetro	Inferior a 50 °C																									
	Registrar la temperatura exterior de la carcaza de la bomba. Dar aviso a Mantenimiento si es > al valor indicado.	Pirómetro	Inferior a 140 °C																									

Figura 8.4.12
Planilla Mensual para la ejecución diaria de una Rutina de Inspección Dinámica (RID).

Estas planillas se completan con un tilde; de existir anomalías se comunican rápidamente al Supervisor quien deberá tomar las medidas correctoras del caso en forma expeditiva.

A partir de los Planes mensuales, sí es conveniente utilizar cronogramas generales o globales. Los mismos permiten ver, de una sola mirada, la cronología de los Trabajos Programados propuestos para cada equipo. Son habituales los cronogramas de 52 columnas en los que cada una representa una semana del calendario. Cada línea de la planilla dará cuenta del equipo y del título de la tarea. Se incluyen otros datos de interés como los ilustrados en la figura 8.4.13

Programación Anual de Tareas de Mantenimiento										Semanas									
#	Equipo	Componente	C.C.	Sector	Trabajo Programado	N°	H/H	Costo Repuestos o Terceros	Frecuencia [días]	1	2	3	4	...	...	...	50	51	52
1																			
2																			
3																			
4																			
5																			
6																			
7																			
8																			
9																			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			

Figura 8.4.13
Cronograma Anual de Trabajos Programados.

Los cronogramas de gestión visual pueden ser tan amplios o específicos como uno quiera. Aunque en uno sólo puedan almacenarse todos los trabajos de un año completo, resultan más efectivos los cronogramas reducidos y divididos por Sector, por tipo de estrategia (Preventivos de frecuencia baja, Grandes Reparaciones, Inspecciones a Condición, Detectivos, Chequeos Estáticos o Dinámicos, etc.) o por especialidad. Si, además, están soportados por un sistema informático, se simplifica enormemente la administración y control de la información permitiendo reprogramar los trabajos que hayan sido postergados o anulados.

Con una o dos semanas de anticipación a cada trabajo (dependiendo de la envergadura de los mismos), el planificador comienza la organización ajustada, y coordina el día de la semana y la hora más conveniente para llevar a cabo las tareas.

Podemos mencionar por último que para elaborar un Programa Maestro de Mantenimiento no debe omitirse la consideración de los siguientes puntos:

√ **Rutinas de Mantenimiento Imperativo**. Son tareas de índole obligatoria, sugeridas por los organismos gubernamentales. Generalmente, estas actividades mandatorias tienen frecuencias bajas (entre uno y diez años) y se hace un programa especial de seguimiento que las separa por especialidad. Son ejemplos de tareas de Mantenimiento Imperativo la prueba hidráulica, tintas penetrantes, ultrasonido y emisión acústica para recipientes sometidos a presión (con o sin fuego), el chequeo de instalaciones eléctricas y electrónicas, la búsqueda de fallos ocultos en redes contra incendios, en sistemas de emergencia o en sistemas de protección y redundantes.

√ **Rutinas de Garantía**. Muchos fabricantes de equipos imponen un conjunto de tareas de mantenimiento, condicionando la garantía del activo a su cumplimiento. Esto impone efectuar ciertos trabajos que deben incluirse en el Programa Maestro de Mantenimiento.

√ **Rutinas Corporativas**. Algunas empresas con filiales en varios sitios, emiten directrices corporativas que son de cumplimiento obligatorio. Generalmente corresponden a rutinas de inspección de sistemas de seguridad (personal o ambiental). Independientemente de los criterios técnicos concebidos por los responsables de Mantenimiento de cada Planta, las mismas deben cumplirse rigurosamente.

√ **Rutinas Inclusivas**. Hay componentes de equipos que poseen más de un modo de falla, y el patrón de degradación de cada uno puede estar sujeto a unidades de funcionamiento diferentes. Un ejemplo sencillo lo representan los neumáticos de automóviles. Se sabe que los daños internos (fatiga) que disminuyen su resistencia estructural pueden aparecer muy probablemente a partir de los 40.000 ó 50.000 Km. (este modo de falla depende del uso). A su vez, el caucho y su paquete de aditivos alcanzan una degradación seria a los 4 años de la fecha de fabricación, aunque el neumático no haya rodado (este modo de falla depende del tiempo). Por tal motivo, los fabricantes recomiendan el reemplazo de los neumáticos cada 40.000 Km. ó 4 años, *lo que ocurra primero*. Una situación similar se presenta en las correas de transmisión (distribución) de los motores de combustión. Los fabricantes recomiendan su reemplazo cada, por ejemplo, 90.000 Km. ó 3 años, lo que ocurra primero. Ver también sección 2.2.3 "Combinación de Tareas" del Capítulo 2.

Nota: Si bien en los Capítulos anteriores se muestran varios formularios y documentos para describir la manera de administrar tareas, es conveniente no manejar muchos formularios diferentes. El modelo de gestión debe escoger algunos pocos tipos de documentos y adaptar todas las actividades a éstos. Vale decir, las Órdenes de Trabajo, Procedimientos, Instructivos, Tarjetas, etc. son documentos que deben estar estandarizados en toda la corporación.

8.4.6 Optimización de un Programa Maestro de Mantenimiento

La Programación y Planificación del Mantenimiento siempre puede ser mejorada. Ningún plan de mantenimiento es estático; se modifica constantemente, se ajustan las frecuencias, se cambian los procedimientos, se opta por repuestos de mejor calidad, etc. Un dicho conocido indica que *si un Plan de Mantenimiento no se modifica al menos una vez al año es porque no se usa.*

El programador trabaja optimizando cronogramas de tareas como el mostrado en la figura 8.4.13. Se realiza una primera agrupación teniendo en cuenta las actividades que requieren detención de máquina. Luego, se agrupan los planes según el Sector al que pertenecen los equipos pues, generalmente, la detención de un equipo conduce a detener el resto. Bajo estas circunstancias puede suceder que haya que detener la máquina casi todas las semanas. El programador, entonces, deberá ajustar (aumentar o disminuir) las frecuencias de algunas rutinas para reducir la cantidad de paradas; siempre con las precauciones técnicas ya mencionadas. El cronograma **ajustado en frecuencias**, debe satisfacer los requerimientos de costo-eficacia; de nada servirá variar una frecuencia si dicha acción redunda en más perjuicios que beneficios.

8.4.6.1 Consejos para elaborar un Programa Provisorio de Mantenimiento[1].

Un Programa Maestro de Mantenimiento debe armarse con los Planes de Mantenimiento de cada equipo. A su vez, cada Plan de Mantenimiento debe haber surgido del estudio detallado de los modos de falla y sus efectos. No obstante, hay veces que las unidades productivas ya están funcionando (o prontas a hacerlo) sin un Plan debidamente diseñado, lo que obliga a contar, por lo menos, con un Plan *Mínimo* o *Provisorio*. La elaboración de un plan provisorio demanda menos tiempo que un plan estratégico, pero será, seguramente, menos eficaz y/o más costoso.

Las recomendaciones para elaborar un plan provisorio son las siguientes:

---

1 Bajo ninguna circunstancia se recomienda aquí la aplicación permanente de Planes de Mantenimiento Provisorios; además de dilapidar recursos "caros" pueden resultar tremendamente peligrosos en materia de seguridad. Las recomendaciones sólo pretenden evitar un mal mayor desde el inicio de la explotación de un activo.

√ *Atender con mucha cautela las recomendaciones del fabricante.* Si existiese un plan de mantenimiento propuesto por el fabricante de la máquina, podemos tomarlo como primera aproximación ante la ausencia absoluta de otra cosa. Sin embargo, cuando el plan definitivo se haya establecido bajo un estudio detallado de los modos de falla en las verdaderas condiciones de explotación del activo, las recomendaciones del fabricante servirán para comprobar algún olvido.

√ *Evitar la replicación de Planes de Mantenimiento.* Aunque resulta tentador, es evidente que lejos está ésta de ser la mejor opción. Es excesivamente peligroso *copiar* o *replicar* planes de mantenimiento de equipos *similares*, excepto para casos muy especiales en los que muchos equipos, además de ser idénticos, tienen exactamente las mismas funciones y se desempeñan en el mismo contexto operativo.

√ *Estudiar primero los Sistemas de Seguridad.* Las unidades operativas se componen de equipos, componentes o subsistemas. Ingeniería de Mantenimiento debe determinar rápidamente aquellos cuyas fallas podrían afectar la seguridad, y proponer estrategias del tipo estándar que las eviten. Esto no siempre da los mejores resultados pero tal vez sea mejor que aguardar a que ocurran las fallas para prevenirlas. Otra posibilidad para resolver la situación de los sistemas de seguridad (y tal vez la mejor), es iniciar con rapidez una revisión RCM aunque sólo sea en los subsistemas de seguridad del activo.

√ *Impulsar Análisis Causa-Raíz de falla.* Más que en cualquier otro caso, los análisis de este tipo son primordiales para las Unidades Operativas que sólo cuentan con un Plan Provisorio de Mantenimiento. Los Análisis Causa-Raíz servirán luego para establecer los modos de falla en un análisis más profundo.

√ *Evitar cualquier relación entre la "criticidad del equipo" y su estrategia de mantenimiento.* En el apartado 7.4.4.2 del Capítulo 7, y más precisamente en la parte correspondiente a **Consideraciones Especiales**, se discutió con profundidad la necesidad de evitar todo intento de hallar (o establecer) una relación entre la criticidad de un equipo y su estrategia de mantenimiento. Con el afán de acelerar la confección de los planes se cae en el error de imponer ciertos tipos de mantenimiento en función de la supuesta criticidad del activo. Incluso se confeccionan tablas en las que se dice, por ejemplo, que los Sistemas de Seguridad por ser muy "críticos" deben ser atendidos con un esquema de mantenimiento que incluya, al menos, acciones predictivas, preventivas, detectivas y, por supuesto, correctivas. Esto es equívoco, según fuera explicado en el epígrafe mencionado, dado que lo que verdaderamente importan son los modos de falla y su patrón de comportamiento. En todo caso, la única relación válida es *criticidad del modo de falla - estrategia de mantenimiento*; que no es más que lo que recomendamos para evitar o destronar los Planes de Mantenimiento **Provisorios** (rápidos). Confeccionar un ranking de equipos no sirve más que para definir por cuáles de ellos comenzar el estudio de la estrategia de mantenimiento; pero jamás para decidir cuál será esa estrategia.

8.4.6.2 Consejos para ajustar el Programa de Mantenimiento a la demanda productiva.

De las estrategias de mantenimiento conocidas sabemos que la que más impacta en los *planes de producción* es el mantenimiento *preventivo periódico de sustitución / restauración* debido a que se necesita detener la marcha de los equipos para efectuarlo. Cabe preguntarse, entonces, qué hacer cuando el plan de producción sufre una variación significativa - no considerada en condiciones normales - que interfiere con el plan programado de mantenimiento o cuando la demanda de disponibilidad de máquina es muy estacional[1].

La interferencia puede manifestarse de dos formas diferentes. En la primera, la demanda de producto (o servicio) disminuye tanto que hay mucho más tiempo para planificar los trabajos. En una situación así, ¿aumentamos (o adelantamos) la carga de mantenimiento aprovechando el mayor tiempo disponible para trabajar sobre la máquina? En principio la respuesta es no. Solamente cabría analizar tal posibilidad si se conoce la relación de proporcionalidad entre el tiempo para el nuevo arranque y el tiempo remanente, para la próxima intervención teórica, contado a partir de dicho arranque.

---

1 Hay empresas embotelladoras de bebidas que tienen gran demanda de producto en ciertos meses del año.

La segunda forma de interferencia se presenta cuando la demanda no está satisfecha y hay que producir bastante más de lo presupuestado. Si la unidad operativa está sujeta a planes de mantenimiento preventivo, la tentación puede ser postergarlos. Evaluemos los argumentos en favor y en contra de postergar las actividades preventivas.

El departamento de mantenimiento dirá que los planes son *mandatorios* y el de producción dirá que deben ser *flexibles*. ¿Quién tiene razón? Lo cierto es que ambos tienen algo de razón, dependiendo de algunas circunstancias particulares entre las que se encuentra el riesgo que esté dispuesto a asumir cada uno.

La postura de **Planes Mandatorios** sólo es defendible si los mismos son verdaderamente eficaces y eficientes, entre otras cosas porque no se hacen tareas de más. Para que un Plan sea eficaz y eficiente debe haber surgido de la revisión minuciosa de los modos de falla y sus **consecuencias**, y no de *pruebas y errores*. Muchas veces por presión jerárquica se postergan planes preventivos y "no pasa nada". Puede no pasar nada por dos motivos: el primero es que el Plan (frecuencia, tareas, procedimientos, etc.) esté realmente mal diseñado y efectivamente nunca pasará nada; el segundo motivo es que no "pasa nada" en lo inmediato pero las consecuencias se vean en el futuro (en este argumento se apoya el área de mantenimiento para defender su postura, aunque no siempre es cierto). Por lo expuesto más arriba, existe una única manera de defender las estrategias de mantenimiento como **mandatorias**, y es que sean demostrablemente efectivas.

Por su parte, la postura de contar con **Planes Flexibles** no es descabellada aunque tiene un límite, y es el costo-beneficio que de tal flexibilización se obtenga. Si el Plan está bien estudiado, la flexibilización incrementa los riesgos de falla durante la explotación del activo, como es lógico. Por el contrario, si el Plan no tiene base científica, la flexibilización podría ser menos perjudicial, pero no deja de ser una incógnita. Téngase en cuenta que cuando se solicita flexibilizar el Plan de Mantenimiento es porque se necesita producir más, en cuyo caso las consecuencias de las averías pueden ser aún peores que en condiciones normales.

Ingeniería de Mantenimiento debe contemplar siempre la posibilidad de flexibilizar los planes de mantenimiento, en la medida que controle debidamente el riesgo. Nunca debe negarse a un nuevo análisis; pero sí, debe defender con firmeza los estudios serios y manifestar todos los riesgos que correrán las funciones de los activos si se altera el plan de mantenimiento.

La estacionalidad de la demanda puede variar considerablemente el plan de mantenimiento de un equipo, porque las consecuencias de las fallas pueden ser completamente distintas según dicha estacionalidad. Incluso, hay organizaciones que diseñan un plan de mantenimiento para cada período del año (baja y alta temporada). Es un ejemplo más de la influencia del contexto operativo en la elaboración de los planes de mantenimiento. El programador y el planificador deben trabajar juntos para atender los requerimientos de flexibilización de planes. El primero aportará su experiencia en la combinación de tareas y en la cuantificación del riesgo por postergar o alterar rutinas, incluso para reemplazar alguna estrategia aunque más no sea provisoriamente; el segundo, planificará más eficientemente.

NOTA: Nunca haga mantenimiento "por las dudas", "ya que estamos" o "if down do[1]"; pero tampoco exponga la instalación al deterioro forzado que, seguramente, "pagará" en el futuro.

8.4.7 Conclusiones

Los profesionales que se dedican al mantenimiento deben desarrollar planes estratégicos e integrales para cumplir con los objetivos comprometidos por la compañía. Dichos objetivos se traducen en Indicadores de Gestión que permiten medir su avance. Resumiendo, podemos decir que los pasos para cubrir una implementación integral son:

√ **Las estrategias**. La empresa tendrá una meta, y el sector mantenimiento debe estar alineado con ella. Habrá que definir la plantilla de equipos que estarán bajo la órbita del área, así como todos los registros relacionados. Se deben priorizar las instalaciones; aquellas que requieren primera atención. Tal

1 Salvo que la estrategia adoptada y más conveniente sea reactiva (Mantenimiento Correctivo) o cuando existan rutinas de inspección estáticas (RIE) de alta flexibilidad en lo que respecta a sus frecuencias de ejecución.

priorización puede hacerse con matrices de criticidad (ver Anexo VI). Luego, se continúa con la etapa de análisis funcional de los sistemas aplicando, por ejemplo, herramientas decisorias como RCM. El resultado será el Plan de Mantenimiento más ajustado a las necesidades del modelo funcional y a los requerimientos de producción y seguridad. Finalmente, hay que implementar las rutinas (con la ayuda de métodos de gestión como el TPM) y auditar su ejecución. Lo último, es evaluar los resultados (indicadores) e introducir las correcciones necesarias.

√ **Los Talentos Humanos**. Habiendo definido qué hay que hacer, se determina con quién hacerlo. Se tendrá que capacitar al personal propio o contratar servicios externos. La empresa debe elaborar un criterio corporativo claro de cuándo es más conveniente contratar servicios o ejecutar las actividades con colaboradores propios.

√ **Los Recursos Materiales**. Los recursos materiales son los medios de que se dispone para llevar adelante las actividades de mantenimiento. El departamento de mantenimiento debe definir las máquinas, herramientas, instalaciones, servicios, repuestos y materiales (consumibles y no consumibles) necesarios. Aquí entra en juego la gestión y política de repuestos (ver Capítulo 9 "Gestión de Repuestos").

√ **Los Sistemas y Procedimientos**. La última parte la constituyen los sistemas y procedimientos escogidos para cumplir con los puntos anteriores. Los procedimientos de programación y planificación deben estar actualizados. Los sistemas informáticos de mantenimiento (SIM) nos ayudan a programar el mantenimiento y a planificar las tareas. Los SIM, además, deben soportar el seguimiento de los indicadores propuestos. En esta parte es muy importante contar con un sistema de mantenimiento certificado bajo normas internacionales de calidad como la ISO 9001.

Los resultados de la implementación de un sistema integral y combinado de mantenimiento, son fundamentales. Lamentablemente no arroja resultados inmediatamente.

8.5 Grandes Reparaciones

Una Gran Reparación es un conjunto de actividades complejas pero organizadas que conlleva la participación de muchas personas y el uso de gran cantidad de recursos materiales como ser máquinas, herramientas y tecnología en general. Se conocen también como Paradas de Planta (*Shutdown*) porque detienen la marcha de los equipos más importantes del proceso productivo. Son eventos que, programados y planificados adecuadamente, brindan excelentes resultados para el negocio.

Muchas industrias se ven obligadas a efectuar estas *recorridas generales* sobre sus equipos porque así lo impone la actividad productiva y el contexto de funcionamiento. Se identifican dos períodos diferentes; el de explotación, que requiere la máxima disponibilidad de los activos y, el de Parada de Planta, en el que se revisan, restauran y ponen a punto las máquinas para reducir las consecuencias de las averías durante el período de explotación o de alta exigencia.

El objetivo de toda empresa que adopta como estrategia una Parada de Planta (PDP) es lograr la máxima disponibilidad de sus instalaciones en la etapa de uso y reducir al mínimo el tiempo y los recursos invertidos en la ejecución de la Parada. Debemos analizar un evento como este, asumiendo que el departamento de mantenimiento ha determinado que no queda ninguna alternativa más que efectuar la detención total de los equipos para restaurar su deterioro acumulado. Vale la aclaración pues aún hoy son muchos los casos en que se aprovecha una Parada de Planta para hacer tareas que podrían hacerse, sin perjuicio alguno, durante el período de operación. Tal situación no hace más que encarecer el evento, incrementar el riesgo de accidentes y elevar la tasa de fallas prematuras en aquellos equipos que han sido intervenidos inútilmente.

Las actividades más frecuentes en una PDP son las *restauraciones* que incluyen la *sustitución* de partes (Mantenimiento Preventivo). Se llaman revisiones totales o puestas a cero (*overhaul*) y son, por lo general, técnicamente complejas. Con esta clase de intervenciones se reparan todos los elementos sometidos a desgaste para asegurar la menor cantidad de fallas durante el tiempo de uso.

Entre las industrias que practican las PDP están los Ingenios Azucareros, las Plantas de Petróleo y Gas, y las Industrias Petroquímicas. En la industria azucarera, por ejemplo, las máquinas deben sufrir pocas fallas durante la época de zafra[1] porque cualquier retraso en la molienda hace que la caña de azúcar pierda parte de sus propiedades naturales afectando el rendimiento del proceso. Aquí, la operación depende completamente del ciclo natural de la caña y durante casi cinco meses (receso) se someten las instalaciones a profundas reparaciones que aseguran altos valores de disponibilidad (> 95%) durante el resto del año. En una industria azucarera las instalaciones más afectadas en zafra son aquellas vinculadas al proceso de Molienda. Estas máquinas, conocidas como *trapiches*, funcionan en un contexto de alta agresividad (erosión, desgaste, corrosión, fatiga, temperatura, etc.) que impone un overhaul a cada una durante el período de receso.

Las Paradas de Planta son actividades que aumentan el riesgo de accidentes laborales por lo que es imprescindible que Ingeniería de Mantenimiento, junto al área de Seguridad, busque la forma de controlar el proceso y evitar accidentes, incidentes o impactos al medio ambiente.

La calidad de los trabajos está vinculada a lo que se conoce como *arranque vertical*. Los equipos deben comenzar a "rodar" sin problemas desde el inicio. Son importantes los chequeos pre-arranque, los controles de calidad, las inspecciones aleatorias y los puntos críticos de control que reducen el tiempo de puesta en marcha. Suele ocurrir, por ejemplo, que cuando una PDP dura 4 semanas la última se destina casi completamente a la puesta en marcha y a las pruebas de iniciación. Si bien es cierto que nunca podrán eliminarse completamente los tiempos de prueba, también es cierto que con las herramientas de control actuales se reducen considerablemente.

Los directivos de las empresas saben que los planificadores sufren gran tensión durante la planificación, ejecución y cierre de una PDP. Sucede que los objetivos que tiene cada sector de la empresa durante la PDP parecen estar encontrados. En realidad no es así; sólo miran el evento desde perspectivas diferentes. Por ejemplo, para Mantenimiento es más importante la Confiabilidad, mientras que para

---

1 La zafra es el período del año que va desde el inicio de la cosecha hasta la finalización de la molienda de la caña de azúcar.

Finanzas el flujo de caja y el gasto. Por su parte, Producción buscará contar con las máquinas reparadas en el menor tiempo posible. No obstante, todos tienen el mismo objetivo final, aumentar las utilidades del negocio ahora y en el futuro. Los Gerentes deben asegurar que los objetivos de todos los sectores estén alineados con el objetivo de la compañía como *Unidad de Negocio*.

Muchas compañías aprovechan este período para otorgarle vacaciones al personal productivo; siendo que básicamente es Mantenimiento quien lleva la mayor carga de trabajo.

8.5.1 Características que distinguen una Parada de Planta

√ Se incrementa considerablemente el riesgo de accidentes o incidentes.
√ Hay un elevado gasto de mantenimiento en un breve período de tiempo.
√ Sin planificación, el evento puede afectar a los clientes y al negocio.
√ La administración de las actividades de Mantenimiento es a gran escala.
√ Durante este tiempo la empresa no produce bienes o servicios.
√ Puede surgir *trabajo emergente*[1] imprevisto a resolver rápidamente.
√ El personal se encuentra fuera de su rutina normal de trabajo.

Sería ideal que durante la Parada de Planta se haga exclusivamente lo necesario; es decir, las actividades imposibles de hacer durante el período de uso. Habría que cambiar el concepto de *hacer lo más posible* por el de *hacer sólo lo que no puede hacerse durante el resto del año*.

Para afrontar el gasto puntual que significa una PDP, la empresa probablemente deba acudir a préstamos o créditos financieros. Esta es razón suficientes para que los ingenieros de mantenimiento programen y reduzcan el volumen de trabajo postergable. Los objetivos del departamento de Mantenimiento en una PDP pueden resumirse en el siguiente listado:

√ Reducir la tasa de accidentes / incidentes.
√ Reducir las consecuencias de los fallos de los equipos intervenidos en la PDP.
√ Reducir la cantidad de recursos materiales gastados.
√ Reducir las horas hombre empleadas (propias y externas).
√ Reducir la cantidad de servicios contratados.
√ Reducir la frecuencia de los trabajos de PDP.

Estas reducciones pueden lograrse solamente con planes de mejora orientados a temas específicos (procedimientos de mantenimiento y operación, estrategias de mantenimiento y tecnologías de predicción y detección, repuestos, materiales y diseño).

Téngase como visión que *cualquier tarea siempre puede hacerse más segura y más rápido, y que siempre hay una mejor manera de hacer cualquier trabajo*.

8.5.2 Fases de una Parada de Planta

Una Parada de Planta puede dividirse en tres etapas:

√ Planificación y Organización
√ Ejecución
√ Terminación y Cierre

8.5.2.1 Planificación y Organización

Es la fase de mayor elaboración administrativa; se determinan las tareas, se presupuesta el gasto, se consolidan los planes de trabajo, se evalúan los proveedores, se verifica la existencia de repuestos y materiales, se emiten las Órdenes de Compra y las Órdenes de Trabajo, se arman las cuadrillas de operarios, etc.

---

*1 Son **trabajos emergentes** las actividades imprevistas de mantenimiento – no programadas – que surgen durante la ejecución de otras tareas de mantenimiento.*

La PDP debe presupuestarse. La compañía querrá contar - con el mayor grado de exactitud y con suficiente anticipación - con la previsión de gastos por mano de obra, materiales y servicios de terceros. Una PDP sin presupuesto es un evento descontrolado financieramente. Desde un punto de vista económico, y a lo largo de un horizonte de análisis suficiente (por ejemplo 5 años), los costos de las Paradas de Planta anuales no deben tomarse como eventos discretos o aislados. Los gastos de una PDP no dependen únicamente del tratamiento que se les ha dado a los activos en el último período de explotación; sino de la historia de uso de esos activos. Además, dependen de los recursos erogados históricamente en otras PDP. De la misma forma, los errores que se cometan en una PDP no necesariamente impacten en el próximo período de explotación, puede suceder que lo hagan algunos años después.

Durante la planificación y organización debe participar un Coordinador General de PDP quien se apoyará en herramientas de trabajo como el SIM vigente, Project Windows (GANTT), Bloques de trabajo, Diagrama de Hitos o Método del Camino Crítico (PERT), entre otros. Posiblemente la coordinación requiera más de una persona (Grupo de Coordinación).

Las principales funciones del Coordinador o del Grupo de Coordinación, son:

- √ Constituir un equipo idóneo de trabajo.
- √ Favorecer la comunicación entre los distintos niveles y sectores de la organización.
- √ Acordar con Producción el alcance y los resultados esperados de cada trabajo.
- √ Asegurar que todos los recursos estén disponibles antes de comenzar la PDP.
- √ Asignar tareas específicas a Ingenieros y Supervisores de Mantenimiento.
- √ Emitir reportes para el seguimiento y cierre de la Parada.
- √ Informar a la Dirección / Gerencia de Planta sobre el avance y desarrollo de los trabajos.
- √ Cumplir con los plazos comprometidos y el presupuesto asignado. Justificar desvíos.
- √ Resolver problemas técnicos y decidir la conveniencia del trabajo emergente.
- √ Resolver conflictos entre personas y/o empresas contratistas.
- √ Colaborar para que los intervinientes cumplan con los requisitos de Seguridad, cuidado del Medio Ambiente y Calidad que demanda la compañía.

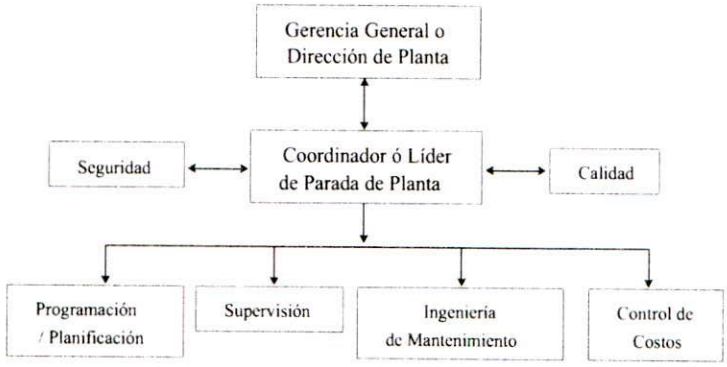
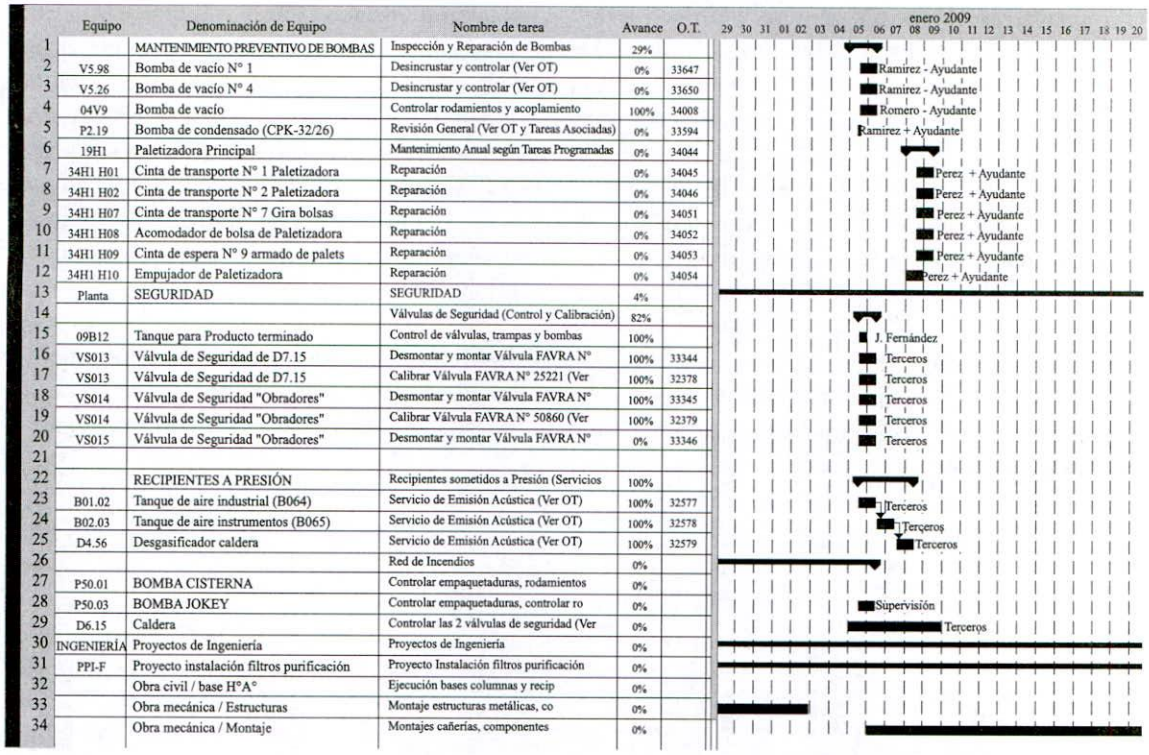


Figura 8.5.1 Estructura de coordinación para una Parada de Planta.

La estructura funcional mostrada en la figura 8.5.1, no implica necesariamente ascendencia jerárquica; solamente muestra la interacción entre el coordinador y el resto de los involucrados. La planificación de tareas depende de la estrategia de mantenimiento adoptada y de la lista de trabajos solicitados por el área de Producción. A su vez, la estrategia depende de factores técnicos y económicos. Es Ingeniería de Mantenimiento y Producción quienes disponen la profundidad y envergadura de cada trabajo. La planificación se hace únicamente en función de lo que es *conveniente hacer*; y nada más.

Los Pedidos de Trabajos emitidos por Producción deben manejarse con cuidado antes de iniciar la Parada de Planta. Muchas veces los deseos superan las necesidades y las posibilidades. Hay quienes piensan que la empresa está obligada a afrontar cualquier gasto por el solo hecho que una tarea es técnicamente posible, olvidando el negocio empresarial y su búsqueda de beneficios. Por supuesto, se excluyen de este argumento las fallas funcionales que pongan en riesgo la integridad personal o afecten el medio ambiente.

El diagrama de GANTT[1] es una de las herramientas más utilizadas para planificar tareas de mantenimiento.



	Equipo	Denominación de Equipo	Nombre de tarea	Avance	O.T.
1		MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE BOMBAS	Inspección y Reparación de Bombas	29%	
2	V5.98	Bomba de vacío N° 1	Desincrustar y controlar (Ver OT)	0%	33647
3	V5.26	Bomba de vacío N° 4	Desincrustar y controlar (Ver OT)	0%	33650
4	04V9	Bomba de vacío	Controlar rodamientos y acoplamiento	100%	34008
5	P2.19	Bomba de condensado (CPK-32/26)	Revisión General (Ver OT y Tareas Asociadas)	0%	33594
6	19H1	Paletizadora Principal	Mantenimiento Anual según Tareas Programadas	0%	34044
7	34H1 H01	Cinta de transporte N° 1 Paletizadora	Reparación	0%	34045
8	34H1 H02	Cinta de transporte N° 2 Paletizadora	Reparación	0%	34046
9	34H1 H07	Cinta de transporte N° 7 Gira bolsas	Reparación	0%	34051
10	34H1 H08	Acomodador de bolsa de Paletizadora	Reparación	0%	34052
11	34H1 H09	Cinta de espera N° 9 armado de palets	Reparación	0%	34053
12	34H1 H10	Empujador de Paletizadora	Reparación	0%	34054
13	Planta	SEGURIDAD	SEGURIDAD	4%	
14			Válvulas de Seguridad (Control y Calibración)	82%	
15	09B12	Tanque para Producto terminado	Control de válvulas, trampas y bombas	100%	
16	VS013	Válvula de Seguridad de D7.15	Desmontar y montar Válvula FAVRA N°	100%	33344
17	VS013	Válvula de Seguridad de D7.15	Calibrar Válvula FAVRA N° 25221 (Ver	100%	32378
18	VS014	Válvula de Seguridad "Obradores"	Desmontar y montar Válvula FAVRA N°	100%	33345
19	VS014	Válvula de Seguridad "Obradores"	Calibrar Válvula FAVRA N° 50860 (Ver	100%	32379
20	VS015	Válvula de Seguridad "Obradores"	Desmontar y montar Válvula FAVRA N°	0%	33346
21					
22		RECIPIENTES A PRESIÓN	Recipientes sometidos a Presión (Servicios	100%	
23	B01.02	Tanque de aire industrial (B064)	Servicio de Emisión Acústica (Ver OT)	100%	32577
24	B02.03	Tanque de aire instrumentos (B065)	Servicio de Emisión Acústica (Ver OT)	100%	32578
25	D4.56	Desgasificador caldera	Servicio de Emisión Acústica (Ver OT)	100%	32579
26			Red de Incendios	0%	
27	P50.01	BOMBA CISTERNA	Controlar empaquetaduras, rodamientos	0%	
28	P50.03	BOMBA JOKEY	Controlar empaquetaduras, controlar ro	0%	
29	D6.15	Caldera	Controlar las 2 válvulas de seguridad (Ver	0%	
30	INGENIERÍA	Proyectos de Ingeniería	Proyectos de Ingeniería	0%	
31	PPI-F	Proyecto instalación filtros purificación	Proyecto Instalación filtros purificación	0%	
32		Obra civil / base H°A°	Ejecución bases columnas y recip	0%	
33		Obra mecánica / Estructuras	Montaje estructuras metálicas, co	0%	
34		Obra mecánica / Montaje	Montajes cañerías, componentes	0%	

Figura 8.5.2
Ejemplo de Planificación GANTT para tareas de Mantenimiento.

Un diagrama de GANTT permite visualizar la duración y precedencia de todas las tareas de un proyecto. Con ayuda de la informática, estos diagramas han mejorado sustancialmente y son múltiples las prestaciones que poseen. El diagrama debe mostrar exclusivamente las tareas con gran probabilidad de ejecución. Frecuentemente se observan diagramas de planificación con tareas que *sería bueno hacer* (deseos) pero que no tienen argumentación económica ni técnica para justificarse. El diagrama general de la PDP debe reflejar la realidad.

Los campos a la izquierda del GANTT (figura 8.5.2), pueden ser los que desee el usuario; equipo, nombre de la tarea, fecha de inicio y fin, duración, avance (%), número de OT, Centro de Costo, Supervisor responsable, cuadrilla de trabajo, o cualquier otra información útil.

El método de gestión para grandes proyectos conocido como PERT (Program Evaluation and Review Technique) fue desarrollado a mediados del siglo pasado y se utiliza para encontrar el tiempo mínimo necesario para completar un proyecto complejo (puede ser una PDP). Las redes o mallas PERT están constituidas por líneas o arcos temporales interconectados por nodos que muestran gráficamente el camino crítico entre el comienzo y fin de un proyecto; los *peligros* (tareas críticas) quedan, así, al descubierto.

Al igual que en un GANTT, primero se arma la lista de tareas específicas, luego la secuencia y conectividad entre ellas y, por último, la duración más probable para cada una. Para estimar la duración más probable se usan funciones de distribución de probabilidad.

1 Henry Laurence Gantt desarrolló esta forma de organizar tareas a principios del siglo pasado en los Estados Unidos.

Cada actividad comienza en un nodo que indica la fecha (u hora) de inicio, y termina en otro con la misma información para la finalización. Ambos nodos se unen por una línea o arco que muestra la duración estimada (o más probable) de la tarea. Por convención, y a la derecha de cada nodo, se ubican el tiempo de inicio temprano (TIO) u *optimista* y el tiempo de inicio tardío (TIP) o *pesimista*, que corresponden a la tarea naciente del nodo. El tiempo de terminación temprana (TTO) y el de terminación tardía (TTP) de la tarea que concurre al nodo, se ubican a la izquierda de éste. La *holgura* es el tiempo disponible que tiene una tarea para comenzar más tarde de lo previsto o para ejecutarse en más tiempo del previsto sin que ninguno de estos factores retarde la finalización del proyecto. Técnicamente una tarea se considera *crítica* cuando su holgura es cero. A su vez, un *camino crítico* es aquel cuyo recorrido - de inicio a fin del proyecto - está compuesto sólo por tareas críticas. Cualquier red PERT tiene, al menos, un camino crítico. El tiempo esperado de finalización del proyecto es la suma de los tiempos esperados de cada tarea sobre el camino crítico. Por tanto, todo retraso en una tarea crítica retarda la finalización del proyecto.

Un método similar, conocido como CPM (Critical Path Method), se diferencia del anterior en que los tiempos estimados para cada tarea son los reales (método determinista) pudiéndolos variar en función de los recursos disponibles. La figura 8.5.3 ilustra un esquema de camino crítico simplificado y generado manualmente.

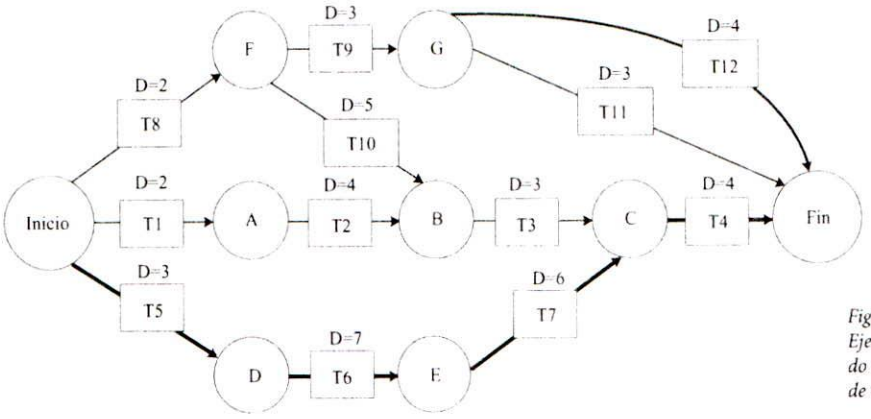


Figura 8.5.3 Ejemplo simplificado de planificación de camino crítico.

En este esquema se aprecia que el proyecto se inicia con tres tareas simultáneamente (T1, T5 y T8). La tarea 2 (T2) puede comenzar sólo cuando finaliza la tarea 1 (T1), conforme indica el nodo A. La tarea 3 (T3) puede iniciarse si las tareas 2 (T2) y 10 (T10) han finalizado. A su vez, las tareas 9 (T9) y 10 (T10) pueden comenzar cuando termina la tarea 8 (T8). Por encima de cada tarea se indica la duración; por ejemplo, la tarea 5 (T5) tiene un tiempo estimado de 3 días. El *camino crítico* queda establecido por las tareas 5, 6, 7 y 4 y el tiempo estimado total para este proyecto es de 20 días.

Las aplicaciones informáticas transforman los diagramas GANTT en diagramas PERT/CPM de manera automática, y viceversa[1].

Teniendo en cuenta las acciones de Mantenimiento, en una PDP se desarrollan las siguientes actividades ya conocidas:

- √ Mantenimiento Preventivo de baja frecuencia y gran envergadura (Overhaul).
- √ Mantenimiento Predictivo / Proactivo para identificar fallas sintomáticas cuyo intervalo Δt_{SF} es mayor al intervalo entre Paradas de Planta.
- √ Mantenimiento Detectivo para identificar fallos ocultos en sistemas de seguridad.
- √ Mantenimiento Legal o Imperativo para satisfacer requerimientos normativos.
- √ Mantenimiento Correctivo para eliminar fallas surgidas como Trabajo Emergente.
- √ Mantenimiento Mejorativo para resolver problemas de diseño en las instalaciones.

1 Se recomienda al lector consultar bibliografía especializada en los temas de referencia.

√ Mantenimiento Restaurativo para eliminar fallas sintomáticas detectadas durante la etapa de explotación de los activos.

Para realizar muchos de estos trabajos, habitualmente se necesita la colaboración de empresas contratistas que, a su vez, pueden subcontratar otros servicios. Los servicios de una empresa contratada van desde la provisión de mano de obra únicamente a la ejecución y supervisión total del trabajo. En el medio, todas las combinaciones imaginables.

El departamento de Mantenimiento comúnmente precisa ayuda externa pues ciertas tareas demandan gran cantidad de operarios que el organigrama estable del área no lo justifica. Otras veces, las tareas requieren personal muy especializado cuyas competencias son inexistentes en la dotación propia de la compañía.

No hay únicamente una justificación económica detrás de la contratación de servicios. Hay trabajos muy específicos (montaje de turbinas, ajuste de grandes cojinetes, overhaul de compresores, montaje de estructuras en altura, reparación de soplantes, radiografiado de soldaduras, etc.) que pueden efectuarse con calidad y en los plazos previstos solamente con experiencia y práctica logrado en trabajos similares. El personal propio de Mantenimiento, no habituado a esas labores, puede decirse que improvisa al realizarlas[1].

Como indica el Capítulo 9, la gestión de repuestos es trascendental, y en una PDP mucho más. Habrá repuestos costosos, específicos y/o de baja rotación, cuya reposición es fácil de olvidar. Incluso habrá otros de uso exclusivo con plazos de entrega muy extensos. Sería poco menos que catastrófico encontrarse en vísperas de una Parada de Planta sin el repuesto imprescindible para realizar un trabajo. La experiencia demuestra que si bien no es común este tipo de descuidos, lamentablemente suelen suceder. Para evitar un error logístico de esta naturaleza es necesario que el proceso de planificación tenga en cuenta la "ruta" de ciertos materiales estratégicos. Lo más sencillo y efectivo son las *Listas de Seguimiento*. Ingeniería de Mantenimiento y el Coordinador deben confeccionar los listados y delegar su seguimiento en una o más personas. Sin embargo, la delegación no implica deslindar la responsabilidad por la llegada a tiempo de los materiales.

Una vez arribados a Planta debe controlarse su calidad y garantizarse su preservación; tareas que también hay que planificar cuidadosamente. El Almacén de Repuestos – que en muchas fábricas depende de Mantenimiento – podrá ser quien asuma la responsabilidad de rastrear el curso de los ítems incluidos en la lista. Por su puesto que el departamento de Compras debe colaborar intercediendo ante el proveedor para asegurar que se cumplan los plazos previstos en la Órden de Compra.

8.5.2.2 Ejecución

La ejecución de los trabajos también requiere de una coordinación general. Puede suceder que ciertos recursos, como los equipos de izaje, sean solicitados por dos o más áreas simultáneamente. Además, puede haber varias empresas (de distinto gremio) que deban trabajar en el mismo sector a la vez, obligando a coordinar finamente cada tarea. Los recursos que normalmente se comparten por su elevado costo son grúas, máquinas viales, servicios de limpieza industrial, elevadores, andamios, tecnología predictiva, etc.

Otra actividad necesaria – y en ocasiones descuidada – es el seguimiento y aprobación de las tareas realizadas tanto por personal propio como por empresas contratistas. La calidad de los mismos depende, en buena medida, de la Supervisión que tenga la empresa.

La coordinación (Coordinador) y la supervisión (Supervisores) deben mantener una fluida comunicación. Hay dos barreras típicas para la comunicación; la tecnológica y la personal. La primera es fácil de solucionar, la segunda requiere de trabajo en equipo que deben promover los líderes de la organización y deben practicar, seria y profesionalmente, los involucrados. El área de Recursos Humanos puede aportar sus capacidades para facilitar la comunicación entre colaboradores.

La presencia del coordinador general de la Parada en todos los sitios de trabajo es esencial. Éste debe recoger las inquietudes de la gente, verificar si se cumplen las normas de seguridad, resolver problemas técnicos y personales que aparezcan, chequear la limpieza de cada sitio de trabajo, evaluar el avance de las tareas, etc.

---

1 Ver Sección 10.5 "Tercerización del Mantenimiento" Capítulo 10.

El seguimiento de los gastos - y su evaluación respecto al presupuesto - es imprescindible durante el evento. Un control preciso (casi a diario), evita desvíos difíciles de justificar una vez cerrada la Parada. En el gasto final influye, como se dijo, el trabajo emergente cuyas causas deben investigarse al concluir la Parada y deben tomarse medidas de predicción más sólidas para evitar futuras sorpresas.

Supóngase que una tarea programada consiste en inspeccionar con partículas magnéticas los cordones de soldadura de un recipiente con fuego sometido a presión. Las estimaciones de Mantenimiento presumieron que era poco probable detectar fisuras en el equipo. Sin embargo, si las mismas aparecen, deberán repararse y volver a inspeccionar. La reparación y la nueva inspección se consideran *Trabajo Emergente.*

Por lo general, para controlar los factores más importantes durante la PDP se usan Indicadores de Gestión que deben medir Avance, Eficiencia, Gastos (materiales, repuestos y mano de obra), Calidad y Seguridad.

8.5.2.3 Terminación y Cierre

La terminación de la PDP incluye el arranque (start-up) de los equipos. El Coordinador tiene activa participación durante la puesta en marcha. Para lograr *arranques verticales* son útiles los programas de puesta en marcha y los chequeos de pre-arranque. Éstos deben confeccionarlos conjuntamente Producción y Mantenimiento.

Luego del arranque, y en régimen los equipos, se terminan de cerrar técnicamente las Órdenes de Trabajo (registro de Historial si aplica).

El pago a proveedores dependerá de la aprobación de los trabajos y el aval técnico de los responsables. Si la Parada de Planta es extensa, pueden aprobarse algunos trabajos antes de la puesta en marcha por razones comerciales. El historial técnico - económico de cada Órden de Trabajo sirve para ajustar consumo de materiales y horas hombre de futuras intervenciones.

El cierre del evento debe incluir un reporte detallado del desempeño de cada colaborador y de cada empresa contratista. La evaluación de los proveedores con relación a calidad, seguridad, plazo de entrega, desempeño general, provisión de materiales y mano de obra, flexibilidad, etc. es útil para evaluar futuras adjudicaciones de Órdenes de Compra.

De la misma forma, el departamento de Seguridad deberá elevar un informe de incidentes, accidentes, conductas no apropiadas del personal, uso de EPP, etc. La Dirección / Gerencia de la empresa debe comprometerse para resolver los problemas que estos reportes reflejen.

En lo que concierne a Calidad, deberán elevarse y resolverse las disconformidades surgidas durante la realización de los trabajos o al finalizarlos.

La figura 8.5.3 muestra un informe característico de cierre de gastos para una PDP.

Reporte de Gastos - Parada Anual 2007 - M$				
Factor	**Presupuestado**	**Planificado**	**Real**	**Δ Gasto**
Total Mantenimiento	**$ 5.155,00**	**$ 5.305,00**	**$ 5.365,00**	**$ 210,00**
Contratos	**$ 2.785,00**	**$ 2.835,00**	**$ 2.895,00**	**$ 110,00**
Servicios Mecánicos	$ 640,00	$ 650,00	$ 660,00	$ 20,00
Servicios Eléctricos	$ 760,00	$ 760,00	$ 810,00	$ 50,00
Análisis Predictivos	$ 55,00	$ 55,00	$ 55,00	$ 0,00
MO Contratada	$ 980,00	$ 1.030,00	$ 1.020,00	$ 40,00
Servicios Profesionales	$ 120,00	$ 110,00	$ 110,00	-$ 10,00
Reparaciones Civiles	$ 230,00	$ 230,00	$ 240,00	$ 10,00
Materiales	**$ 1.330,00**	**$ 1.420,00**	**$ 1.430,00**	**$ 100,00**
Repuestos	$ 760,00	$ 790,00	$ 820,00	$ 60,00
Materiales Varios	$ 480,00	$ 540,00	$ 530,00	$ 50,00
Insumos	$ 90,00	$ 90,00	$ 80,00	-$ 10,00
Mantenimiento	**$ 1.040,00**	**$ 1.050,00**	**$ 1.040,00**	**$ 0,00**
MO Propia	$ 860,00	$ 870,00	$ 880,00	$ 20,00
Otros Gastos	$ 180,00	$ 180,00	$ 160,00	-$ 20,00

Figura 8.5.3
Reporte de Gastos de Mantenimiento para el cierre de una Parada de Planta.

8.5.3 Seguridad en una Parada de Planta

Como se dijo, el riesgo de accidentes e incidentes aumenta considerablemente durante el desarrollo de una PDP; los factores que más contribuyen a su incremento son los siguientes:

√ Varias personas contratadas de distintos gremios trabajan en sitios comunes. Además, no están familiarizadas con el ámbito ni con las normas internas de la empresa.
√ Generalmente los trabajos son en altura y/o en espacios confinados. Otras veces, incluso, pueden surgir emisiones químicas no controladas o proyecciones de líquidos peligrosos.
√ Falta de capacitación, motivación y/o compromiso de los empleados.
√ Alto volumen de trabajo en períodos cortos de tiempo.
√ Presión para cumplir con los plazos de entrega previstos para el arranque.

Los trabajos de la PDP (planificados o no) deben desarrollarse según las normas de Seguridad que indiquen los responsables. Para reducir el riesgo de accidente es conveniente, además:

√ Planificar todas las actividades considerando el tiempo necesario para cumplir con los procedimientos de Seguridad Personal.
√ Garantizar buena comunicación entre los niveles y sectores involucrados.
√ Promover inspecciones de Seguridad y/o Auditorias de cumplimiento de normas.
√ Controlar las máquinas y herramientas ingresadas a la Planta por empresas contratistas.
√ Asegurar el orden y la limpieza general en cada jornada de trabajo.
√ Confeccionar Permisos de Trabajo y evaluar el riesgo de cada actividad que se inicia.
√ Utilizar, en todos los casos, los elementos de protección personal (EPP) solicitados.

Todas las rutinas, instructivos o procedimientos de trabajo, deben ser **seguros**. Un trabajo se considera seguro si en ningún momento de su ejecución es posible herir a alguien, afectar el medio ambiente o dañar las instalaciones. Un sistema de seguridad bien consolidado hace uso de *Permisos de Trabajo* y *Tarjetas de Desconexión de motores* con el adecuado circuito de firmas y aprobación. Las Órdenes de Trabajo deben mencionar los EPP obligatorios y las precauciones a tener en cuenta. Las áreas de trabajo deben estar bien cercadas y señalizadas y los peligros debidamente indicados para que cualquier persona, aún carente de capacitación técnica, los pueda comprender. Por ejemplo, un procedimiento de trabajo debe indicar si es necesario manipular productos químicos y cuales son las medidas precautorias.

El mayor desafío de cualquier organización es que TODO su personal tome conciencia de la Seguridad y esté en condiciones de identificar actos y condiciones inseguras antes, durante y al concluir un trabajo, pudiéndolas reportar inmediatamente a quien corresponda.

Conforme el personal toma conciencia de su seguridad, y la de los demás, se hacen menos necesarias las auditorias. Las "patrullas" del departamento de Seguridad nunca fueron del todo efectivas. Da mejores resultados que la persona se cuide a sí misma y a sus compañeros, en lugar de ser controlados y hasta castigados por cometer actos inseguros.

No obstante, cuando sean necesarias las auditorias, es recomendable adoptar una postura pedagógica y no policiaca pues a nadie le gusta ser investigado. Dando explicaciones justas y haciendo docencia pueden obtenerse buenos resultados porque *la mejor capacitación es en campo*. El objetivo es que la persona reflexione acerca de los riesgos que corre él y los que lo rodean.

8.5.4 Calidad en una Parada de Planta

Como ocurre en todo proceso que tiene como fin asegurar la Calidad de bienes o servicios, no es suficiente con controlar únicamente los trabajos una vez concluidos. Es preferible que cada paso de un trabajo se haga bajo estándares de Calidad progresivamente chequeados.

El criterio de **calidad total** aplica perfectamente en una Parada de Planta. Cada paso de una rutina debe hacerse con Calidad. No obstante, son útiles los *controles de calidad*.

Un control de calidad es una actividad específica y estandarizada que garantiza un mínimo nivel de calidad para un producto o servicio, dejando al descubierto las fallas o imperfecciones residuales. Por ejemplo, los chequeos de alineación, las inspecciones no destructivas de soldaduras o fugas de gases o los controles de materiales y repuestos, son *controles finales de calidad.*

La Calidad merece atención **antes** y **después** de finalizar un trabajo. Los *procedimientos e instructivos* son útiles para asegurar la calidad durante la realización del trabajo; los *controles de calidad* son efectivos al finalizarlo.

No todas las actividades de una PDP deben tener especificaciones de calidad rigurosas. Sólo hay que establecer las necesidades de calidad y sus límites de tolerancia en aquellas rutinas de mantenimiento que así lo requieran. Un proceso de aseguramiento de la Calidad para una Parada de Planta, requiere:

√ Establecer un *procedimiento específico* para asegurar la Calidad durante el evento.
√ Identificar *documentos* (procedimientos, instructivos, especificaciones, estándares, etc.) *críticos de mantenimiento* y establecerlos como de *cumplimiento obligatorio.*
√ Establecer *puntos críticos de control* y/o *ensayos de comprobación.*
√ Establecer *parámetros críticos de control* y *sus niveles de aprobación.*
√ Establecer *procedimientos de puesta en marcha* o *chequeos de arranque.*

Aunque parezca un juego de palabras cabe saber que un procedimiento que pretenda asegurar calidad debe ser de calidad.

8.5.5 Infraestructura y Mantenimiento Edilicio

Incluimos en esta sección una breve reseña del Mantenimiento de la Infraestructura Industrial porque es frecuente aprovechar que la Planta interrumpe totalmente su actividad para efectuar estas tareas.

El mantenimiento edilicio está cobrando cada vez más atención. La realidad demuestra que es necesario analizar detenidamente la estrategia para cada instalación. Lamentablemente siempre se pensó de manera reactiva en este sentido. Sin embargo, hay muchas actividades pro-activas que pueden y deben hacerse en este sentido. Entre ellas encontramos:

√ Limpieza de conductos, chimeneas, ascensores, canaletas de techo y pluviales, cámaras, desagües, alcantarillas, tanques, persianas, paredes, mamposterías, acondicionadores de aire, instalaciones sanitarias, antenas, luminarias, alumbrados, etc.
√ Reparación, pintura y tratamiento superficial de mamposterías, aberturas y techos.
√ Control radiográfico de almas de hormigón.
√ Mantenimiento de juntas de dilatación y verificación de pavimentos.
√ Búsqueda de fallos ocultos en red de incendios, protecciones eléctricas, circuitos de puesta a tierra, baterías, tuberías de gas, ascensores y elevadores, telecomunicaciones, escaleras mecánicas, bombas, grupos electrógenos, fuentes de alimentación, etc.

Fuera del ámbito industrial, los establecimientos educativos también requieren estrategias de mantenimiento efectivas. Los riesgos que corren sus ocupantes, si por ejemplo se cayera alguna mampostería o habría pérdidas de gas, hace que deban analizarse varios modos de falla y plantear en consecuencia planes de mantenimiento preventivos. Muchas actividades de mantenimiento que se hacen en las escuelas, están orientadas a prevenir accidentes.

Si el deterioro acumulado de las instalaciones es avanzado, se necesitarán grandes partidas presupuestarias para eliminarlo y seguramente figurarán en los balances como **Proyectos de Inversión**. En su lugar, deben mantenerse las funciones de los Edificios de la misma forma que se hace con cualquier otro activo productivo utilizando el presupuesto de Mantenimiento.

La industria hotelera es otro rubro donde el mantenimiento es cada vez más importante. Una buena estrategia de mantenimiento permite generar grandes ahorros energéticos y mejorar el servicio al cliente. Además, un hotel perderá imagen y categoría cuando las instalaciones no se conservan adecuadamente.

Otras rutinas, tal vez de menor frecuencia, que comúnmente se realizan para conservar el buen estado de los edificios son:

- √ Limpieza de frentes de edificios (arenado / hidrolavado).
- √ Limpieza de alfombras, aspirado y encerado de pisos.
- √ Reemplazo de lámparas, fusibles y artefactos eléctricos.
- √ Prueba (búsqueda de fallos ocultos) en disyuntores u otras seguridades eléctricas.
- √ Reparación de aislaciones térmicas, acústicas e hídricas.
- √ Reparación de pavimentos y toma-juntas.

El mercado ofrece SIM's específicos para administrar y gestionar activos de edificios.

8.6 Seguridad y Mantenimiento

Trabajar con Seguridad es responsabilidad de todos. Esta es una frase conocida por aquellos que, de alguna u otra manera, han estado cerca de la actividad industrial. Las empresas deben fomentar la conciencia por la seguridad y facilitar la reducción de las *condiciones inseguras* proveyendo los medios y recursos para lograrlo. Los empleados, por su parte, deben evitar las *acciones inseguras* mientras desarrollan sus actividades. Hay, entonces, dos factores importantes a considerar en adelante: las *condiciones inseguras* y las *acciones inseguras*. Una condición insegura puede aparecer en máquinas, herramientas, instalaciones, equipos, dispositivos, elementos de protección personal (EPP), etc. Las acciones inseguras las cometen las personas con comportamientos negligentes que ponen en peligro su integridad física. No obstante, detrás de una acción insegura hay factores latentes que deben investigarse y analizarse detenidamente.

La capacitación en materia de Seguridad ayuda a que cualquier miembro de la organización desarrolle los trabajos con seguridad y pueda, además, identificar condiciones inseguras. La empresa institucionalmente no puede identificar por sí sola las condiciones inseguras; no hay más alternativa que delegar esta responsabilidad en TODOS y cada uno de sus miembros. Sin embargo, una vez identificadas, es responsabilidad de la empresa – a través de sus líderes y del modelo de gestión que posea – disponer los medios para eliminarlas. Los responsables de Mantenimiento tienen mayor responsabilidad que sus colaboradores. Ellos deben lograr que los empleados trabajen con seguridad, que disminuyan el riesgo de accidente en sus labores, que denuncien toda condición insegura sin temor, y que den máxima prioridad a la integridad física de sus compañeros, etc. Un grupo de personas que se cuida y protege es menos vulnerable a los accidentes.

Un accidente (o incidente) puede suceder aún en la zona más segura. Por tal motivo, de los factores mencionados el más importante es el de evitar acciones inseguras. Un colaborador bien entrenado sabrá identificar una condición insegura y tomará los recaudos necesarios para evitar accidentes, aún cuando esto signifique no efectuar la tarea.

No obstante, mantener las herramientas, materiales e instalaciones en óptimas condiciones de seguridad también es importante, pues hay factores que escapan al control de los usuarios. Por ejemplo, un trabajador estará en peligro si su casco de seguridad está vencido (aunque es importante que él este al tanto de ese detalle), si realiza tareas donde se produce un escape de vapor porque falla una válvula, o si su jornada de trabajo transcurre en una zona con alto grado de contaminación no perceptible por el colaborador.

Muchas situaciones riesgosas para la salud de los trabajadores no tienen consecuencias inmediatas, pero provocan daños o enfermedades crónicas en el futuro. Preservar la salud de los empleados y sus familias debe ser una prioridad para toda organización y el departamento de Mantenimiento tiene mucho por hacer en este sentido.

8.6.1 Principio de Heinrich

La pirámide de Heinrich[1] nos enseña que por cada accidente grave que sucede, se estarían produciendo 300 desvíos menores que, aún sin ocasionar daño alguno, son potencialmente capaces de provocar un accidente similar al ocurrido. Los incidentes o desvíos menores muchas veces pasan desapercibidos.

Figura 8.6.1 Pirámide de Heinrich.

El proceso causal que gobierna los accidentes, incidentes y desvíos es común a éstos; por lo tanto, investigar y analizar los incidentes y los desvíos es útil para prevenir lesiones graves o muertes (accidentes).

1 En su libro "Industrial Accident Prevention: a scientific approach", Heinrich H. W. propuso esta idea alrededor de 1935.

Supóngase por caso que un grupo de trabajadores se encuentra efectuando tareas al pie de un silo de gran altura. A la parte superior del mismo, donde también hay que realizar trabajos, se accede a través de una escalera vertical adosada a la pared del silo. Un desvío menor sucedería si un trabajador descuidado deja una herramienta contundente como ser un martillo apoyado en uno de los escalones superiores no produciendo ninguna otra consecuencia. Si por causa de alguna vibración, el martillo cae e impacta en un equipo dañándolo, estaríamos en presencia de un incidente. Ahora bien, si por razones del azar dicho martillo golpea la cabeza de un trabajador hiriéndolo, entonces el incidente se transforma en un claro accidente. Obsérvese que la causa raíz del desvío, del incidente y del accidente es la misma; una **acción insegura** cometida por un trabajador que olvida una herramienta en un lugar inapropiado[1].

Este ejemplo pone de manifiesto que evitando los desvíos disminuimos el riesgo de sufrir accidentes graves y que los desvíos deben investigarse con el mismo rigor que los accidentes, porque las causas raíz que derivan en ellos generalmente son las mismas.

Para llegar a la causa raíz de eventos de esta naturaleza puede usarse la técnica del Por qué - Por qué, el Análisis Causa - Raíz de Falla (RCA) o el Diagrama Causa - Efecto.

8.6.2 Situaciones Inherentemente Riesgosas

La probabilidad de que un trabajador sufra una lesión permanente o transitoria durante su rutina habitual, se llama riesgo laboral. El riesgo depende, entre otras cosas, del contexto en que la persona desarrolla su actividad. Los responsables de Mantenimiento deben asegurar que dicho riesgo se mantenga dentro de valores tolerables. A continuación se describen algunos eventos a los que el personal de mantenimiento está expuesto en su trabajo cotidiano y sobre los que es precautorio tomar medidas para evitarlos.

√ **Golpes**. Esta categoría incluye golpes, raspaduras, machucones o cortes en cualquier parte del cuerpo. Los ocasionan habitualmente objetos en movimiento (cargas, vehículos, máquinas, herramientas, equipos rotantes, etc.).

√ **Atrapamientos**. Estos accidentes ocurren al introducir una parte del cuerpo en el interior de una máquina. También suceden atrapamientos contra objetos en movimiento como grúas, vehículos, máquinas viales, etc.

√ **Sobreesfuerzos**. Un sobreesfuerzo es una situación clara de acción insegura (originada por causas latentes). Es una de las causas que provocan el mayor número de accidentes y lesiones en la zona lumbar. Ocurren al manipular cargas u objetos inadecuadamente. La capacitación en este sentido es muy importante.

√ **Caídas**. Dentro de esta categoría se encuentran las caídas desde andamios, escaleras, puentes, instalaciones, edificios, o las caídas dentro de pozos, excavaciones o zanjas. También ocurren caídas sin mediar diferencia de altura como ser aquellas producidas por tropiezos, resbalones o desniveles menores. Afortunadamente el primer grupo de caídas son menos frecuentes aunque las consecuencias suelen ser mucho peores.

√ **Caídas de objetos**. Es importante diferenciar la caída de objetos, de los golpes y de las caídas de personas, porque las causas que las provocan son distintas. Cualquier objeto, por pequeño que sea, puede causar serios daños si cae desde una altura considerable. Se incluyen en esta categoría los derrumbes, desplomes, desprendimientos y la caída de materiales extraños desde alturas elevadas.

√ **Proyección de objetos**. Un tipo de accidente muy común es la proyección de fragmentos o partículas extrañas como virutas, astillas o escorias sobre ojos y piel. Ocurren al operar máquinas herramientas sin usar elementos de protección personal (EPP).

---

1 Lamentablemente el ejemplo relatado fue un hecho verídico.

√ **Explosiones e Incendios.** Las explosiones y los incendios causan, por lo general, serios daños. El trabajo en atmósferas explosivas[1] debe ser programado cuidadosamente por especialistas para evitar detonaciones o deflagraciones. Los incendios son eventos causados por efecto del fuego y pueden producir quemaduras, intoxicación o asfixia.

√ **Quemaduras.** Ocurren cuando hay exposición comprometida a temperaturas extremas. El contacto directo con puntos calientes (o extremadamente fríos) puede provocar heridas serias en la piel e, incluso, en los órganos vitales.

Otras situaciones de riesgo que merecen ser atendidas son la inhalación de sustancias tóxicas, la ingesta de productos peligrosos, las quemaduras con productos químicos, el contacto o choque eléctrico, la exposición a radiación, etc.

8.6.3 Gestión de la Seguridad

El departamento de Mantenimiento es responsable por las condiciones de trabajo de su gente. La importancia de evitar acciones inseguras queda en manos de los líderes del sector. Sin embargo, los altos mandos de la organización deben mostrar un firme compromiso por la seguridad de sus empleados, haciendo todo lo que esté a su alcance para reducir los riesgos. El grado de coherencia determina el éxito de cualquier programa de seguridad. Algunos Directores de empresas suelen hablar demasiado y exigir seguridad en todo momento, pero luego su conducta no es coincidente con sus dichos.

Un modelo efectivo para reducir considerablemente las acciones inseguras es el que establece tres pasos antes de encarar cualquier actividad: **Observar**, **Decidir** y luego **Actuar**. El método consiste básicamente en dotar a las personas de herramientas de decisión sencillas que le permitan dominar, en todo momento, las situaciones de peligro. La conciencia por la seguridad puede aprenderse.

En primer lugar la persona debe **observar** completamente el contexto en el que trabajará (percibir todo a su alrededor) analizando cada punto del lugar e identificando las situaciones de peligro. Esto obliga a que se orienten todos los sentidos en búsqueda de condiciones inseguras y se aumente la concentración.

Luego debe **decidir** la acción precisa a realizar. El proceso de decisión, cumpliendo con el paso anterior, es ahora más seguro. Tomar una decisión habiendo hecho un análisis de la situación, reduce el riesgo de accidentes. La persona debe pensar en los riesgos que corre al efectuar cada tarea. La decisión deberá incluir, al menos, un repaso mental de los pasos a seguir durante todo el trabajo.

Finalmente, la persona **actúa**. La acción (ejecución del trabajo) transcurre bajo una decisión pensada detenidamente en lugar de actuar impulsivamente "sin pensar". La idea de este paso es que la persona, habiendo decidido correctamente, no cometa actos inseguros producto del apresuramiento o del exceso de voluntarismo. Muchos accidentes suceden porque se procede impulsivamente y sin pensar detenidamente cada uno de los pasos del trabajo que se hará.

El estado psicológico de las personas afecta su conducta, y ésta puede poner en riesgo su seguridad. El nivel de atención de las personas debe ser el óptimo para cada situación. El mayor grado de fiabilidad en la conducta de una persona se alcanza cuando su estado de conciencia es *normal y despejado*[2]. Personas excesivamente relajadas (casi inconscientes) o muy tensas tienden a cometer mayor cantidad de actos inseguros.

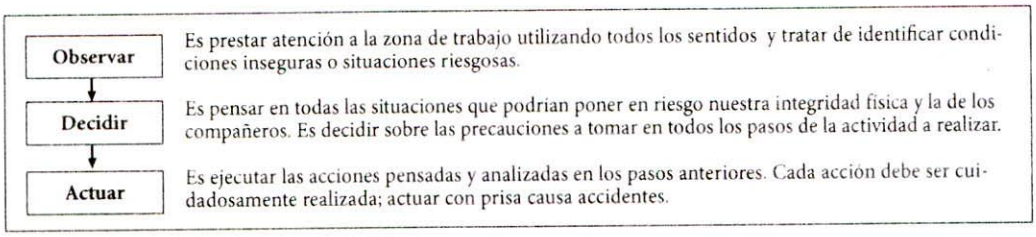


Figura 8.6.2 Ciclo de Seguridad.

1 Una atmósfera explosiva es una mezcla de aire con gases, vapores, nieblas, polvos o fibras inflamables que en condiciones atmosféricas normales, y después de producida la ignición, la combustión se propaga a través de toda la mezcla no consumida. Se recomienda al lector consultar bibliografía especializada en atmósferas explosivas.

2 Concepto extraído de la página 341 del libro "TPM in Process Industries" de Takutaro Suzuki y otros autores (Japan Institute of Plant Maintenance). Ver referencia bibliográfica.

Las siguientes son algunas herramientas utilizadas en la Gestión de la Seguridad.

√ **Permisos de Trabajo**. Un permiso de trabajo - formalizado habitualmente por medio de tarjetas de cartón - minimiza las condiciones inseguras. Los riesgos se reducen cuando los responsables del sector productivo validan que el equipo está desconectado, despresurizado, aislado, frío o sin otros trabajos por hacer. Además, los permisos de trabajo reflejan en su contenido los riesgos que implica la tarea, así como los EPP que deben usarse. Un permiso de trabajo pone en conocimiento al operario sobre los riesgos que encierra su labor. Una vez concluida la tarea, el personal de mantenimiento debe devolver el permiso debidamente firmado asegurando que el equipo está en condición segura de operación. Ver figura 8.6.3.

√ **Tarjetas de Peligro**. Son un complemento de los Permisos de Trabajo. Su misión es alertar o advertir a las personas que circundan los equipos intervenidos (o sus sistemas de control) que sobre ellos está trabajando personal de mantenimiento. Estas tarjetas invalidan cualquier intención de poner en funcionamiento, energizar, cerrar, encender, o tomar alguna acción sobre los equipos afectados **aunque las exigencias productivas lo demanden**.

Nombre de la Empresa — Permiso de Trabajo

N° **3165**

Fecha:... .../...../..... Hora:..... .....

Equipo / Sector:.....

Trabajo a Efectuar:.....

.....

Vigencia: DEL ...../...../..... AL...../...../.....

RIESGOS POTENCIALES

Presión	Golpes	Aprisionamiento
Salpicadura	Caídas	Inhalación polvo/gas
Temperatura	Incendio	Caída de Objetos
Otros		

Rutina de Control	Sí	No	NA
1- ¿Se descomprimió y/o purgó el equipo ó instalación?			
2- ¿Se ventiló el equipo ó instalación?			
3- ¿Se lavó / limpió el equipo ó instalación?			
4- ¿Se desconectó eléctricamente el motor de accionamiento?			
5- ¿Se cerraron las válvulas de ingreso al equipo ó instalación?			
6- ¿Se consideraron todos los posibles retornos?			
7- ¿Se bloquearon todas las conexiones con bridas ciegas?			
8- ¿Existen procedimientos para el trabajo a realizar?			
9- ¿Se verificó el cumplimiento de los procedimientos?			
10- ¿Se analizó la contaminación del aire interior?			
11- ¿Existe riesgo de incendio o explosión?			
12- ¿Se verificó que existen elementos cortantes peligrosos?			

Equipos de Protección Personal (EPP) Requeridos

Casco	Guantes	Equipo autónomo
Anteojos	Cercado / Vallado	Calzado apropiado
Protector facial	Arnés / Soga	Otros
Máscara de respiración		

Observaciones:.....

Supervisor de Operaciones	Responsable del Trabajo	Seg. y M. Ambiente
.....	.....	.....
Firma:	Firma:	Firma:

EQUIPO / SECTOR:.....

Se ha inspeccionado y verificado el cumplimiento satisfactorio de los puntos precedentes.

Fecha:.....

..... Hora:.....

Firma Responsable del Trabajo — Permiso de Trabajo N° **3165**

Figura 8.6.3
Permiso de Trabajo.

√ **Tarjetas de Desconexión**. Junto a las Tarjetas de Peligro, las tarjetas de desconexión son una seguridad para la gente que efectúa trabajos de mantenimiento en equipos con accionamiento eléctrico. El circuito de una Tarjeta de Desconexión es más exigente. Mientras la Tarjeta de Peligro es *informativa*, la Tarjeta de Desconexión es *prohibitiva*. El circuito de gestión de estas tarjetas se inicia con las personas que deben intervenir un equipo, solicitando al sector eléctrico la desconexión del motor. Una vez desconectado, personal del área eléctrica entrega a los solicitantes la correspondiente

Tarjeta de Desconexión **numerada**. La misma es troquelada de forma que una parte (con el mismo número) queda en poder del área eléctrica. A su vez, las personas que intervienen el equipo guardan consigo la tarjeta hasta que finalizan los trabajos. El departamento eléctrico no puede conectar el equipo si aquellos que solicitaron la desconexión no entregan la Tarjeta debidamente firmada. La firma y entrega de la Tarjeta de Desconexión garantiza que el equipo puede ser reconectado, a menos que exista - en poder del área eléctrica y para el mismo motor - otra parte de una Tarjeta de Desconexión con otro número. Tal situación puede ocurrir si más de un grupo de personas decide trabajar sobre el mismo equipo y solicitan individualmente la desconexión del mismo motor.

√ **Instalaciones Seguras**. No tener bajo control los modos de falla cuyas consecuencias ponen en riesgo a las personas, es una *condición insegura*. Los planes y programas de mantenimiento deben evitar o minimizar las consecuencias de aquellos modos de falla capaces de lesionar a alguien o afectar el medio ambiente. El Mantenimiento tiene como prioridad la Seguridad. Además, una instalación segura es aquella que señaliza las áreas de peligro con claridad y exactitud. La información debe ser precisa y reducida; el exceso de información atenta contra la seguridad.

√ **Manejo del Cambio**. El apartado 8.2.4 menciona lo importante de contar con información técnica confiable. Se presenta una condición insegura si un equipo ha sido modificado y las personas que deben intervenirlo lo ignoran. En algunos casos una situación como esta puede tener consecuencias catastróficas.

√ **Investigación de accidentes, incidentes y desvíos menores**. Un punto importante en la prevención de accidentes es la investigación de los ocurridos. Poner de manifiesto los desvíos que provocaron un desenlace desafortunado sin ánimo de encontrar culpables, es la mejor manera de evitar la recurrencia y aprender de los errores cometidos en situaciones similares. También resultan útiles los registros de incidentes porque, con la eliminación de sus causas, se minimizan los riesgos (ver pirámide de Heinrich). El objetivo de investigar un accidente, incidente o desvío menor, es entender las causas que lo provocaron y diseñar métodos para prevenirlos.

√ **Auditorías de Seguridad**. Desde un enfoque institucional las auditorías de seguridad ya fueron presentadas en el apartado 7.4.4.8 "Pilar - Higiene, Seguridad y Medio Ambiente". Sin embargo, el departamento de Mantenimiento, en conjunto con el de Seguridad, puede llevar a cabo rutinariamente algunos controles de aseguramiento interno.

8.6.4 Procedimientos de Seguridad en Mantenimiento

Dentro de sus documentos, el departamento de Mantenimiento debe contar con procedimientos (generales y específicos) que establezcan la manera más segura de trabajar para no arriesgar la salud e integridad física de las personas. Administrarlos y mantenerlos actualizados, también es su responsabilidad. Todo procedimiento de seguridad vinculado a Mantenimiento debe contener:

√ Objetivo y Alcance.
√ Responsabilidades de los involucrados.
√ Medidas de índole general a adoptar antes, durante y al concluir los trabajos.
√ Desarrollo de los contenidos propuestos.
√ Acciones inmediatas en caso de accidente o incidente.
√ Anexos.

Los procedimientos generales establecen las pautas de los procederes seguros que respetarán los integrantes del plantel de mantenimiento en un sentido amplio de comportamiento. Como su nombre lo deja ver, marcan los lineamientos generales de cómo desempeñarse con seguridad.

Los procedimientos específicos, en cambio, están relacionados con actividades específicas como soldadura, desconexión de equipos eléctricos, fumistería, trabajos en tanques y cañerías presurizadas o con productos químicos, tareas predictivas como gammagrafía y termografía, maniobras eléctricas en conductores, motores, transformadores, capacitores, baterías, etc.

Escapa al alcance de esta sección transcribir un modelo completo de procedimiento, por lo que la figura 8.6.4 ilustra únicamente una tabla fragmentada para el bloqueo de equipos rotantes como parte central (desarrollo) de un procedimiento de mantenimiento específico.

Bloqueo de Equipos Rotantes	
#	Descripción
1	Solicitar el Permiso de Trabajo correspondiente.
2	Llevar los mecanismos a su posición de reposo.
3	Desactivar el funcionamiento de la máquina.
4	Solicitar y realizar la desconexión eléctrica, neumática o hidraúlica según sea la fuerza motríz utilizada.
5	Confeccionar la Tarjeta de Desconexión o la Tarjeta de Peligro según corresponda.
6	Asegurar la ausencia de fuentes energéticas residuales.
7	En lo posible, trabar mecánicamente el equipo.
8	Cerrar todas las válvulas que ingresen o salgan del equipo.
9	Asegurar la ausencia de puntos calientes y atmósferas peligrosas.
10	Vallar la zona de trabajo e instalar las señalizaciones necesarias.

Figura 8.6.4 Secuencia de tareas para el bloqueo de equipos rotantes.

Otro de los documentos usados por Mantenimiento para evitar situaciones peligrosas son los chequeos de Seguridad como el que muestra la figura 8.6.5. Son complementarios de los Permisos de Trabajo, las Tarjetas de Peligro y las Tarjetas de Desconexión eléctrica.

EMPRESA "XX" Página: 1/1

Documento de Mantenimiento: **DM-05**
Para Órden de Trabajo: **35234**

Sector: Calderas		Fecha: 12/03/2005
Descripción del Trabajo: Reemplazo válvula de vapor VP-022		
Responsable: J. Fernandez	Inicio: 12/03/2005	Fin: 12/03/2005
Dotación: Cuadrilla D	Hora de inicio estimada: 08:30	
Permiso de Trabajo N°: 2567	Motivo de la Intervención: Preventivo	Prioridad: Normal
Empresa Subcontratista: No		

	Sentencias de Control (Inicio de Tareas)	Respuestas	
		Sí	No
1	¿Se observaron todos los detalles y se utilizaron todos los sentidos para identificar condiciones inseguras?		
2	¿El personal posee y utiliza todos los elementos de protección personal requeridos?		
3	¿El equipo se encuentra sin más presión que la atmosférica?		
4	¿Existe la posibilidad que el recipiente posea gases inflamables o peligrosos?		
5	¿Se ha confeccionado el correspondiente Permiso de Trabajo?		
6	¿Se ha confeccionado la correspondiente Tarjeta de Peligro? ¿Está ubicada en el lugar apropiado?		
7	¿Se ha solicitado la correspondiente Tarjeta de Desconexión eléctrica?		
8	¿Se han instalado bridas ciegas o placas en lugares de riesgo?		
9	¿Se ha informado al departamento de Seguridad la intervención a realizar?		
10	¿Existe la posibilidad de que haya salida de condensado, líquidos peligrosos u otras sustancias?		
11	¿Hay peligro de caídas, golpes o quemaduras?		
12	¿Existe en la zona material inflamable de cualquier tipo?		
13	¿Las máquinas / herramientas a utilizar cuentan con las debidas protecciones?		
14	¿Están correctamente señalizadas las zonas de peligro?		
15	¿Existe un procedimiento conocido por los intervinientes para casos de emergencia?		
Firma de los Responsables:			

	Sentencias de Control (Finalización de Tareas)	Respuestas	
		Sí	No
1	¿Los trabajos han concluido satisfactoriamente?		
2	¿Se han desconectado todas las máquinas / herramientas utilizadas?		
3	¿Se han retirado del lugar todas las instalaciones provisorias?		
4	¿Se encuentra el sitio de trabajo en condiciones óptimas de limpieza? ¿Se han retirado los restos de electrodos, escorias, metales, maderas, trapos, etc.?		
5	¿Se han firmado y entregado las Tarjetas de Peligro y/o Desconexión eléctrica?		
6	¿Se ha entregado debidamente firmado el Permiso de Trabajo?		
7	¿Hay seguridad que el Departamento de Producción está al tanto de la finalización de los trabajos de Mantenimiento?		
Firma de los Responsables:			

Figura 8.6.5 Documento para aplicar sentencias de control.

La lista de chequeo de la figura anterior es sólo un ejemplo. Cada organización podrá confeccionar sentencias de control que se ajusten a las necesidades propias. Incluso, podrá haber una lista de chequeo para cada tipo de trabajo: maniobras eléctricas, manejo de piezas pesadas, trabajos en recipientes con fuego, trabajos en zonas radiadas, trabajos de soldadura, montajes en altura, manipuleo de sustancias peligrosas, trabajos en recipientes para almacenar hidrocarburos y sus derivados, trabajos en atmósferas explosivas, etc.

Resumen de aplicación

8.1 Introducción

- *Mantenimiento debe administrar eficientemente todo el caudal de información que demanda y genera la gestión de activos y programar y preparar las actividades para garantizar el cumplimiento de las funciones de dichos activos.*

8.2 Registros de Mantenimiento

- *Contar con información confiable en todo momento y, además, asegurar que se cumplan todos los procedimientos internos y externos que demanda la organización, sólo puede lograrse con un modelo de gestión de mantenimiento sencillo pero eficaz.*

8.2.1 Maestro de Equipos

- *Algunos modelos funcionales priorizan la información técnica, descuidando la administración de gastos de mantenimiento. Otros, por el contrario, hacen hincapié en los aspectos contables en detrimento de un mejor seguimiento técnico de los trabajos. Debe encontrarse un equilibrio que atienda aceptablemente todas las necesidades.*

- *Un Maestro de Equipos es una lista de todos los equipos de Planta cuya estratificación en niveles deriva en lo que se llama Árbol de Equipos ó Árbol Lógico de Equipos. Un Árbol de Equipos es un arreglo que jerarquiza en niveles la nómina de los activos que están (o pueden estar) sujetos a acciones de mantenimiento y sobre los que puede imputarse gastos.*

- *Para constituir un Árbol de Equipos (figura 8.2.1) es común adoptar como nivel superior la Planta o Unidad de Negocio que puede estar dividida en Sectores Productivos. Por su parte, una Unidad Operativa es un conjunto de Equipos vinculados físicamente para cumplir una función definida.*

- *Un Componente es la unidad que la empresa adopta como indivisible desde el punto de vista técnico y económico.*

8.2.2 Codificación del Maestro de Equipos

- *Si se toma el primer ejemplo de cada nivel de la figura 8.2.1, puede adoptarse la siguiente secuencia de codificación.*

  Planta QE: Químicos Especiales
  Sector 2101: Molienda y Mezcla
  Unidad Operativa ML01: Molino Principal
  Equipo RE01: Reductor de Accionamiento

- *Se llama posición lógica o de proceso a la ubicación usada para representar una función específica en Planta. La posición QE-2102-ML01 es la posición de proceso en la que debe haber instalado una unidad funcional cuya función es moler producto bajo ciertas condiciones (ver figura 8.2.1).*

- *Aunque los números correlativos de codificación no aportan ninguna información acerca del equipo, la codificación correlativa (también llamada auto-numérica) evita diseñar complejos sistemas alfanuméricos que hacen casi imposible hacer cualquier modificación en el futuro como, por ejemplo, incorporar nuevos niveles en el árbol jerárquico, agregar nuevas clases de equipos, cambiar la estructura de posiciones lógicas o físicas, etc.*

8.2.3 Tipos de Registros

- *Existen dos tipos de registros: los de administración, llamados registros duros, y los registros de uso o de reporte.*

- *Los registros de uso son aquellos que reportan o modifican los usuarios del sistema cotidianamente (o los sistemas automáticos de registración) como el historial técnico, las horas de marcha, los gastos por mano de obra, las fallas (según algún criterio de codificación para modos de falla), los repuestos utilizados en cada intervención, las detenciones imprevistas, los trabajos programados, el contenido de las órdenes de trabajo (OT), el libro de guardia, la lista de pedidos correctivos, etc.*

8.2.4 Gestión de la Información y Manejo del Cambio

- *Una lista completa con todos los modos de fallas de un equipo, es un conjunto de datos. Si la misma lista establece, por ejemplo, cuáles de ellos provocan las peores consecuencias en la cadena productiva, entonces esos datos se transforman en información.*

- *Un adecuado manejo de los cambios es indispensable para contar con información confiable. Por manejo del cambio se entienden todas aquellas acciones administrativas que deben realizarse para que cualquier modificación de los activos (o su contexto) se vea reflejada inmediatamente y sin errores u omisiones en los sistemas de gestión de mantenimiento.*

8.3 Sistemas Informáticos de Mantenimiento (SIM)

- *Un SIM (ó CMMS - Computerized Maintenance Management System) es una base de datos que almacena registros y puede mostrarlos de forma particular a través de funciones específicas. Su uso, casi imprescindible en la actualidad, exime a la organización de efectuar tareas de bajo valor agregado dejando más tiempo para el análisis. La programación y preparación del trabajo es más eficiente con menos horas-hombre administrativas.*

8.3.1 Módulos

- *Los SIM se dividen en módulos y éstos, ocasionalmente, en sub-módulos. Un módulo es una parte del sistema que se encarga de administrar información específica. La mayoría de los SIM ofrecen módulos de Historial, Análisis de Fallas, Programación, Personal, Inventarios, Herramientas, Costos, Gestión, Lubricación, Inspección, Predictivos, Pedidos, Compras, Abastecimiento, etc.*

8.3.2 Tablas para Modos de Falla

- *Normalmente la vinculación Equipo - Componentes se realiza a través de dos tablas. Una, es la tabla Equipos cuyos campos sirven para registrar información relacionada con el activo. La otra, es la tabla Componentes cuyos campos pueden contener datos técnicos e información vinculada al propio componente (código de fabricación, código de compra, tipo, cantidad, descripción, etc.). La vinculación de las dos tablas se hace a través de un campo clave (presente en ambas) que es el Código de Equipo (Posición Lógica o Física). La relación entre las dos tablas evita almacenar una gran cantidad de registros y permite armar listados de componentes para cualquier Equipo.*

- *Por su parte, la tabla Modos de Falla brinda datos uniformes para describir la avería de cualquier Equipo o Unidad Operativa. Cuando los modos de falla están bien codificados, se establece una relación lógica entre el funcionamiento del equipo y sus averías. Con el tiempo, se sabrá los modos de falla que sufrió el activo y si las tareas de mantenimiento están siendo efectivas.*

8.3.3 Programación

- *Este módulo administra los Planes de Mantenimiento para cada activo. Cualquier modificación que sufra el Plan, obliga a modificar algún parámetro de los registros. El sector responsable de los Planes debe estandarizar la forma de referirse a cada acción posible de mantenimiento (Revisar, Inspeccionar, Verificar y Controlar).*

8.3.4 Avisos de Trabajo

- *Todo SIM debe permitir canalizar las necesidades de las áreas productivas (solicitudes de reparación correctivas). El módulo Avisos (o Pedidos) de Trabajo presenta al usuario un formulario de diálogo que se completa al momento de hacer la solicitud de reparación. El Aviso de Trabajo debe indicar la prioridad con la que Mantenimiento tiene que afrontar el trabajo.*

8.3.5 Órdenes de Trabajo

- *El corazón de la Gestión de Activos es la Órden de Trabajo (OT). Una OT debe describir las tareas e incluir procedimientos de trabajo, normas, técnicas de inspección, etc.*

- *Una OT puede ser Reactiva o Pro-activa dependiendo de su procedencia. Si proviene de un Aviso de Trabajo probablemente se convierta en Correctiva; si se emite automáticamente desde un Plan Programado será una OT Pro-activa (Preventiva, Predictiva, Detectiva, Mejorativa, etc.).*

- *La información que contiene una OT se divide en tres rubros: Datos de Cabecera, Datos Centrales o de Trabajo y Datos de Gestión (Contables y Técnicos).*

8.3.6 Historial

- *En el módulo Historial hacen su aporte el cierre de las OT, el libro de guardia, el registro de fallas y los ingresos directos por eventos puntuales. Si bien el Historial de un equipo es importante, el registro de fallas suele estar dogmatizado. Hay una tendencia casi fanática a registrar cualquier evento ocurrido durante la explotación o mantenimiento. Sin embargo, el registro de fallas sólo es útil en la medida que se cumplan dos condiciones. La primera, que sea estrictamente necesario saber cuántas veces falló. La segunda, que el registro de fallas provea información y sea confiable.*

8.3.7 Reportes de Mantenimiento

- *La Gerencia y Jefatura de Mantenimiento precisan reportes simples y rápidos. La generación de los reportes no debería insumir más de 15 minutos. Los reportes deben ser parametrizables por el usuario o por un administrador designado de acuerdo a un estándar definido por la organización.*

8.3.8 Proceso de un SIM

- *Ver diagrama de la figura 8.3.4.*

8.3.9 Relación del SIM con otras soluciones informáticas

- *El SIM debe estar integrado con las demás soluciones informáticas que tenga la organización por medio de interfases. Un punto importante es la vinculación del SIM con el sistema contable y financiero. La primera diferencia aparece en los gastos de mantenimiento. Mientras el SIM valoriza las acciones de mantenimiento mediante las OT's, el sistema contable seguramente hará lo propio mediante el sistema*

de compras y pago a proveedores. Si bien las diferencias no deberían ser grandes, es preciso que los gastos – en ambos sistemas – coincidan lo más posible.

- *El mayor inconveniente se presenta en la administración del presupuesto de mantenimiento. En este punto los sistemas deben estar integrados. El SIM debe permitir hacer comparaciones entre el presupuesto y el gasto real incurrido.*

8.3.10 Selección e Implementación del SIM

- *Antes de seleccionar un SIM debe analizarse el modelo funcional vigente en la organización para comprender qué necesita la empresa. El modelo funcional describe funciones, requerimientos y responsabilidades de las distintas áreas, la relación entre ellas y la secuencia de las operaciones desarrolladas.*

- *Acordado el modelo funcional, deben evaluarse las ofertas del mercado analizando las bondades, limitaciones, costos y alcance de cada una.*

- *La implementación del SIM debe transitar las siguientes etapas (ver figura 8.3.5): armar una estructura sólida de liderazgo y un Grupo Núcleo de trabajo, nombrar un referente técnico por cada Unidad de Negocio, confeccionar y aprobar el cronograma del proyecto, poner en evidencia las diferencias entre las capacidades del producto y las necesidades del cliente, arribar a una solución equilibrada para manejar las diferencias, diseñar el modelo detallado, preparar los Datos Maestros y armar los programas de migración, realizar corridas de prueba (testing), capacitar a los usuarios, migrar la totalidad de los datos y efectuar los lanzamientos escalonadamente.*

8.3.11 Ventajas y Desventajas de los SIM

- *Un SIM permite controlar y reducir los gastos de mantenimiento, aumenta la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia, reduce el tiempo administrativo, ayuda a planificar y programar tareas pro-activas y reactivas, facilita la previsión de gastos, crea reportes e informes estandarizados, provee datos para impulsar planes de mejora y acciones de benchmarking, administra formularios (certificados de calibración, permisos de trabajo, etc.) y facilita el manejo del cambio.*

- *La falta de profundidad en algunas fases del proyecto puede provocar que se desaproveche la capacidad inherente de la solución, se eroguen grandes sumas de dinero sin el retorno de inversión esperado, se adapte el modelo funcional de la organización al sistema y se complique el manejo de los datos con otras soluciones informáticas cuando las interfases no son las adecuadas.*

8.4 Programación Integral y Preparación del Mantenimiento

- *Para implementar un Plan de Mantenimiento Integral hay que saber qué vamos a mantener, con qué estrategia, cómo lo vamos a hacer y cuándo es el mejor momento (ver figura 8.4.1).*

- *La programación de un Plan de Mantenimiento Integral consiste en ubicar cronológicamente las tareas dentro de un horizonte temporal; la preparación asegura la disponibilidad de materiales y recursos para desarrollar las actividades.*

- *El programador trabaja de forma "masiva" ubicando los Trabajos Programados en un horizonte de programación; el preparador toma cada evento del programa, lo transforma en una (o más) OT y organiza minuciosamente la secuencia de tareas asegurando que los recursos estén disponibles y que haya factibilidad operativa de realizarlo.*

- *El programador calendariza las actividades de alta y baja frecuencia, con o sin detención de marcha, a realizar con personal de la empresa, externo o de producción.*

- *El planificador toma cada Trabajo Programado y organiza la actividad por completo. Debe asegurar la disponibilidad de mano de obra, los repuestos, herramientas, materiales, instrumentos de medición, etc., y la disponibilidad de los servicios externos.*

8.4.1 Procedimientos de Mantenimiento (Documentos)

- ***Norma**: Estándar para reglamentar la forma de realizar una actividad (o fabricar un producto).*

- ***Manual**: Documento, en forma de compendio, que enuncia lo más substancial de una materia.*

- ***Procedimiento**: Documento normalizado cuya finalidad es enunciar la metodología que garantiza el cumplimiento de cierto proceso o la fabricación de un producto.*

- ***Especificación**: Documento técnico conciso que sirve para indicar los parámetros correctos - y sin ambigüedades - que debe esperarse de un determinado objeto o trabajo.*

- ***Registro**: Documento trazable para acumular datos y dejar evidencia de alguna acción técnica o administrativa factible de ser auditada en el futuro.*

- ***Instructivo**: Documento cuya secuencia lógica de instrucciones u operaciones sirve de guía para realizar una tarea (generalmente técnica).*

8.4.2 Mantenimiento Preventivo - Programación y Planificación

- *La preparación de las rutinas preventivas es clave para evitar pérdidas de tiempo y pérdidas económicas. Ver figura 8.4.5.*

- *Para programar un conjunto de rutinas preventivas es habitual basarse en múltiplos de los planes "mandantes". Una rutina es mandante si su frecuencia no es alterable porque las consecuencias del fallo que pretende evitar afectan la seguridad, o porque el costo de su realización o consecuencias es elevado. El resto de las rutinas (no mandantes) se ajustan a las primeras quedando como múltiplos de éstas y reduciendo su intervalo.*

- *Una práctica efectiva de planificación es aquella en la que el planificador prepara los trabajos para toda la semana y entrega al Supervisor (distribuidos por día y área) los trabajos a realizar en cada jornada. Se conoce como Weekly Planning y el comienzo de cada actividad se coordina junto al responsable de producción en una reunión semanal.*

8.4.3 Mantenimiento Condicional - Programación y Planificación

- *Si el diagnóstico de las acciones de mantenimiento condicional arroja un resultado desfavorable, se coordina el momento más oportuno para efectuar las restauraciones tendientes a evitar que el equipo padezca una falla funcional.*

- *El Mantenimiento Condicional no requiere gran planificación en comparación con el Preventivo, excepto si es necesario preparar la instalación o si es imposible acceder a ciertas partes del equipo en funcionamiento. Ver figura 8.4.7 en la que se sugiere prestar atención a las siguientes cuatro etapas: programación de la Ruta, identificación de parámetros generales desviados, diagnóstico de la falla sintomática a través de los parámetros singulares y restauración y/o eliminación de la falla sintomática.*

- *Una vez definidas todas las tareas a condición, deben agruparse por tipo de técnica. Se obtendrá una lista de equipos con sus puntos de inspección para cada técnica (Vibraciones, Análisis de Aceites, Termografía, etc.). Un mismo equipo puede tener más de un punto de inspección y cada punto tener más de una medición; por tanto, es preciso armar la lista (Ruta) con suficiente apertura para tener en cuenta todas las mediciones.*

- *Con esta información se arman las Hojas de Rutas o los Trabajos Programados en el SIM que se transformarán luego en una OT con los puntos que hayan alcanzado la fecha teórica de ejecución (ver figura 8.4.9).*

- *Es fácil caer en la tentación de alterar (reducir) la frecuencia de inspección si no han aparecido valores de alerta o de alarma luego de varias mediciones. Sin embargo, si el intervalo Δt_{SF} fue bien estimado para cada punto y la técnica demuestra confiabilidad, no debería cambiarse la frecuencia según la estadística de los resultados favorables, dado que dicha frecuencia no depende de cuán a menudo se manifiesta la falla sintomática. Una reducción de la frecuencia de inspección sólo se justifica si se logra un mejor conocimiento del mecanismo de degradación de la variable; vale decir, cuando se acepta que el intervalo Δt_{SF} es mayor que el antes estimado.*

8.4.4 Mantenimiento Detectivo – Programación y Planificación

- *Las tareas de búsqueda de fallas se programan y planifican para que los chequeos interfieran lo menos posible en la actividad productiva. De todas formas, de por sí, tienen baja interferencia.*

- *La agrupación por tipo de dispositivo y por rango de frecuencias, es la más ventajosa. Se arma una lista de tareas para las redundancias (activas y pasivas) y otra para las protecciones interruptivas, indicativas y contensivas. Luego, y para cada uno de los grupos, se ordenan las tareas ascendente o descendentemente según sus intervalos de ejecución.*

- *En la búsqueda de fallos ocultos no es dañino aumentar la frecuencia de los chequeos en la medida que la tarea no tenga posibilidades de dejar el dispositivo fuera de servicio (ver ecuación 5.3.19 del Capítulo 5 y sus comentarios).*

- *Las acciones detectivas sobre dispositivos redundantes, por lo general, no requieren gran planificación. Lo mismo ocurre para las protecciones contensivas. Sin embargo, en protecciones indicativas la planificación es más compleja y aún más en las protecciones interruptivas. Estas últimas requieren mayor planificación dado que una verdadera "prueba en caliente" requerirá seguramente la interrupción del sistema funcional (por lo general ésta es la única manera de asegurar que el sistema protector "interrumpe" o detiene el sistema protegido efectivamente).*

- *Muchas tareas simples de búsqueda de fallas pueden efectuarlas los operadores de los equipos, dada su cercanía a la máquina.*

8.4.5 Programa Maestro de Mantenimiento

- *Los planes diarios o semanales se trabajan con planillas que tienen un casillero para cada día y operación (ver figura 8.4.12).*

- *Para los Planes mensuales es conveniente utilizar cronogramas generales (globales) porque permiten ver la cronología de los Trabajos Programados de cada equipo (ver figura 8.4.13).*

- *Los cronogramas de gestión visual pueden ser tan amplios o específicos como uno quiera. Aunque en uno sólo puedan almacenarse todos los trabajos de un año completo, resultan más efectivos los cronogramas reducidos y divididos por sector, tipo de estrategia (Preventivos de frecuencia baja, Grandes Reparaciones, Inspecciones a Condición, Detectivos, Chequeos Estáticos o Dinámicos, etc.) o especialidad.*

8.4.6 Optimización de un Programa Maestro de Mantenimiento

- *La Programación y Planificación del Mantenimiento siempre puede mejorarse. Ningún plan de mantenimiento es estático; se modifica constantemente, se ajustan las frecuencias, se cambian los procedimientos, se opta por repuestos de mejor calidad, etc.*

- *Un Programa Maestro de Mantenimiento debe armarse con los Planes de Mantenimiento de cada equipo. A su vez, cada Plan debe haber surgido del estudio detallado de los modos de falla y sus efectos. No obstante, hay veces que las unidades productivas ya están funcionando (o prontas a hacerlo) sin un Plan debidamente diseñado, lo que obliga a contar, por lo menos, con un Plan Mínimo o Provisorio. La elaboración de un plan provisorio demanda menos tiempo que un plan estratégico pero será, seguramente, menos eficaz y/o más costoso.*

- *Para elaborar un plan provisorio debe tenerse en cuenta con mucha cautela las recomendaciones del fabricante (si existiese un plan propuesto por el fabricante de la máquina, podemos tomarlo como primera aproximación ante la ausencia absoluta de otra cosa), evitarse la replicación de planes de mantenimiento (aunque resulta tentador está lejos de ser la mejor opción), estudiarse primero los sistemas de seguridad, impulsarse análisis Causa-Raíz de falla y evitarse cualquier relación entre la "criticidad del equipo" y su estrategia de mantenimiento.*

- *Para ajustar un Programa de Mantenimiento a la demanda productiva, debe evaluarse la interferencia. La interferencia puede manifestarse de dos formas. En la primera, la demanda de producto (o servicio) disminuye tanto que hay mucho más tiempo para planificar los trabajos. En una situación así: ¿aumentamos (o adelantamos) la carga de mantenimiento aprovechando el mayor tiempo disponible para trabajar sobre la máquina? En principio la respuesta es no. Sólo cabría analizar tal posibilidad si se conoce la relación de proporcionalidad entre el tiempo para el nuevo arranque y el tiempo remanente, para la próxima intervención teórica, contado a partir de dicho arranque.*
  El segundo tipo de interferencia se presenta cuando la demanda no está satisfecha y hay que producir más de lo presupuestado. Si la unidad operativa está sujeta a planes de mantenimiento preventivo, la tentación puede ser postergarlos. En todos los casos, deben evaluarse los argumentos en favor y en contra de postergar las actividades preventivas.

- *Existe una única manera de defender las estrategias de mantenimiento como mandatorias, y es que sean demostrablemente efectivas.*

- *La postura de contar con Planes Flexibles no es descabellada aunque tiene un límite, y es el costo-beneficio que de tal flexibilización se obtenga. Si el Plan está bien estudiado, la flexibilización incrementa los riesgos de falla durante la explotación del activo. Por el contrario, si el Plan no tiene base científica, la flexibilización podría ser menos perjudicial aunque no deja de ser una incógnita. Téngase en cuenta que cuando se solicita flexibilizar el Plan de Mantenimiento es porque se necesita producir más, en cuyo caso las consecuencias de las averías pueden ser aún peores que en condiciones normales.*

- *El programador y el planificador deben trabajar en conjunto para atender los requerimientos de flexibilización de planes. El primero aportará su experiencia en la combinación de tareas y en la cuantificación del riesgo por postergar o alterar rutinas; el segundo, planificará más eficientemente.*

- *Nunca haga mantenimiento "por las dudas", "ya que estamos" o "if down do"; pero tampoco exponga la instalación al deterioro forzado que, seguramente, "pagará" en el futuro.*

8.4.7 Conclusiones

- *Mantenimiento debe desarrollar planes estratégicos e integrales para cumplir con los objetivos propuestos. Los factores influyentes para lograr una implementación integral son las* ***Estrategias****, los* ***Talentos Humanos****, los* ***Recursos Materiales*** *y los* ***Sistemas*** *y* ***Procedimientos****.*

8.5 Grandes Reparaciones

- *Una Gran Reparación es un conjunto de actividades complejas pero organizadas, que conlleva la participación de muchas personas y el uso de gran cantidad de recursos materiales (máquinas, herramientas y tecnología en general). Se conocen también como Paradas de Planta (Shutdown) porque detienen la marcha de los equipos más importantes del proceso productivo.*

- *El objetivo de toda empresa que adopta como estrategia una Parada de Planta (PDP) es lograr la máxima disponibilidad de sus instalaciones en la etapa de uso y reducir al mínimo el tiempo y los recursos invertidos en la ejecución de la Parada.*

- *Las actividades más frecuentes en una PDP son las restauraciones que incluyen la sustitución de partes (Mantenimiento Preventivo). Se llaman revisiones totales o puestas a cero (overhaul) y son, por lo general, técnicamente complejas.*

- *Entre las industrias que practican las PDP se encuentran los Ingenios Azucareros, las Plantas de Petróleo y Gas, y las Industrias Petroquímicas.*

- *Las Paradas de Planta son actividades que aumentan el riesgo de accidentes laborales por lo que es imprescindible que Ingeniería de Mantenimiento, junto al área de Seguridad, busque la forma de controlar el proceso y evitar accidentes, incidentes o impactos al medio ambiente.*

8.5.1 Características que distinguen una Parada de Planta

- *Durante una PDP se incrementa el riesgo de accidentes o incidentes, hay un elevado gasto de mantenimiento, pueden verse afectados los clientes, la administración de las actividades es a gran escala y el personal se encuentra fuera de su rutina normal de trabajo.*

8.5.2 Fases de una Parada de Planta

- *Una PDP se divide en tres etapas: Planificación y Organización, Ejecución, Terminación y Cierre*

- ***Planificación y Organización****. Es la fase de mayor elaboración administrativa; se determinan las tareas, se presupuesta el gasto, se consolidan los planes de trabajo, se evalúan los proveedores, se verifica la existencia de repuestos, se emiten las Órdenes de Compra y las Órdenes de Trabajo, se arman las cuadrillas de operarios, etc. La planificación de tareas depende de la estrategia de mantenimiento adoptada y de la lista de trabajos solicitados por el área de Producción. A su vez, la estrategia depende de factores técnicos y económicos. Mantenimiento y Producción disponen la profundidad y envergadura de cada trabajo. La planificación se hace únicamente en función de lo que es conveniente hacer; y no más. El diagrama de GANTT es una herramienta muy utilizada para planificar las tareas de mantenimiento de una PDP.*

- ***Ejecución***. *La ejecución de los trabajos requiere de una coordinación general. Puede suceder, por ejemplo, que ciertos recursos como los equipos de izaje sean solicitados por dos o más áreas simultáneamente. Además, puede haber varias empresas (de distinto gremio) que deban trabajar en el mismo sector a la vez, obligando a coordinar finamente cada tarea.*
  Los recursos que normalmente se comparten por su elevado costo son, grúas, máquinas viales, servicios de limpieza, andamios, tecnología predictiva, etc.
  La coordinación (Coordinador) y la supervisión (Supervisores) deben mantener una comunicación fluida.

- ***Terminación y Cierre***. *La terminación de la PDP incluye el arranque (start-up) de los equipos. El Coordinador tiene activa participación durante la puesta en marcha. Para lograr arranques verticales son útiles los programas de puesta en marcha y los chequeos de pre-arranque. Luego del arranque, y en régimen los equipos, se terminan de cerrar técnicamente las OT (registro de Historial si aplica).*
  El cierre del evento debe incluir un reporte detallado del desempeño de cada colaborador y de cada empresa contratista. El departamento de Seguridad debe elevar un informe de incidentes, accidentes, conductas no apropiadas del personal, uso de EPP, etc. La Dirección / Gerencia de la empresa debe comprometerse para resolver los problemas que estos reportes reflejen. En lo referente a Calidad, deberán elevarse y resolverse las disconformidades surgidas durante la realización de los trabajos.

8.5.3 Seguridad en una Parada de Planta

- *Los factores que más incrementan el riesgo en una PDP son la cantidad de personal contratado de diferentes especialidades, los trabajos no convencionales (en altura, en espacios confinados, etc.), la falta de capacitación, motivación y/o compromiso de los empleados, el alto volumen de trabajo y la presión de cumplir con los plazos previstos para el arranque.*

- *Un sistema de seguridad consolidado hace uso de Permisos de Trabajo y Tarjetas de Desconexión de motores con el adecuado circuito de aprobación. El mayor desafío de cualquier organización es que TODO su personal tome conciencia de la Seguridad y que esté en condiciones de identificar actos y condiciones inseguras antes, durante y al concluir un trabajo.*

8.5.4 Calidad en una Parada de Planta

- *Un control de calidad es una actividad específica y estandarizada que garantiza un mínimo nivel de calidad para un producto o servicio, dejando al descubierto fallas o imperfecciones residuales.*

- *Un proceso de aseguramiento de la Calidad para una PDP requiere que se definan documentos (procedimientos, instructivos, especificaciones, estándares, etc.) de cumplimiento obligatorio y que se establezcan puntos críticos de control y procedimientos de puesta en marcha.*

8.5.5 Infraestructura y Mantenimiento Edilicio

- *Entre las acciones pro-activas de mantenimiento edilicio encontramos la limpieza de conductos, chimeneas, pluviales, cámaras, desagües, tanques, mampostería, acondicionadores de aire, instalaciones sanitarias, etc., la reparación, pintura y tratamiento superficial de aberturas y techos, el control radiográfico de almas de hormigón y el mantenimiento de juntas de dilatación. Además, se destacan la búsqueda de fallos ocultos en redes de incendio, protecciones eléctricas, circuitos de puesta a tierra, baterías, tuberías de gas, ascensores y elevadores, telecomunicaciones, escaleras mecánicas, bombas, grupos electrógenos, fuentes de alimentación, etc.*

8.6 Seguridad y Mantenimiento

- *Las organizaciones deben fomentar la conciencia por la seguridad y facilitar la reducción de las condiciones inseguras proveyendo los medios y recursos necesarios. Los empleados, por su parte, deben evitar las acciones inseguras mientras desarrollan sus actividades.*

- *Una condición insegura puede estar presente en máquinas, herramientas, instalaciones, equipos, dispositivos, elementos de protección personal (EPP), etc.*
  Las acciones inseguras las cometen las personas con comportamientos negligentes que ponen en peligro su integridad física. No obstante, detrás de una acción insegura hay factores latentes que deben investigarse detenidamente. La empresa institucionalmente no puede identificar por sí sola las condiciones inseguras; no hay más alternativa que compartir esta responsabilidad con TODOS y cada uno de sus miembros. Sin embargo, una vez identificadas, es responsabilidad de la empresa disponer los medios para eliminarlas.

- *Un colaborador bien entrenado sabrá identificar una condición insegura y tomará los recaudos necesarios para evitar accidentes.*

8.6.1 Principio de Heinrich

- *La pirámide de Heinrich (ver figura 8.6.1) muestra que por cada accidente grave que ocurre, se estarían produciendo 300 desvíos menores que, aún sin ocasionar daño, son potencialmente capaces de provocar un accidente similar al ocurrido.*

8.6.2 Situaciones Inherentemente Riesgosas

- *El personal de mantenimiento se expone cotidianamente a golpes, atrapamientos, sobreesfuerzos, caídas, caída y proyección de objetos, explosiones, incendios y quemaduras, entre otras.*

8.6.3 Gestión de la Seguridad

- *Mantenimiento es responsable por las condiciones de trabajo de su gente. La importancia de evitar acciones inseguras queda en manos de los líderes del sector. Los altos mandos de la organización deben mostrar un firme compromiso por la seguridad de sus empleados haciendo todo lo que esté a su alcance para reducir los riesgos.*

- *Un modelo efectivo para reducir considerablemente las acciones inseguras es el que establece tres pasos antes de encarar cualquier actividad:* ***Observar***, ***Decidir*** *y luego* ***Actuar****. El método consiste en dotar a las personas de herramientas de decisión sencillas que le permitan dominar, en todo momento, las situaciones de peligro.*

- *El estado psicológico de las personas afecta su conducta que pone en riesgo su seguridad. El nivel de atención de las personas debe ser el óptimo para cada situación. El mayor grado de fiabilidad en la conducta de una persona se alcanza cuando su estado de conciencia es normal y despejado. Personas excesivamente relajadas o muy tensas tienden a cometer mayor cantidad de actos inseguros.*

- *Los instrumentos más usados para gestionar la seguridad en el ámbito del Mantenimiento son los Permisos de Trabajo (ver figura 8.6.3), las Tarjetas de Peligro, las Tarjetas de Desconexión, las instalaciones seguras, las investigaciones de accidentes, incidentes o desvíos menores y las Auditorías de Seguridad.*

8.6.4 Procedimientos de Seguridad en Mantenimiento

- *Dentro de sus documentos, el área de Mantenimiento debe contar con procedimientos (generales y específicos) que establezcan la manera más segura de trabajar.*

- *Todo procedimiento de seguridad vinculado al Mantenimiento debe contener: objetivo y alcance, responsabilidades de los involucrados, medidas de índole general a adoptar antes, durante y al concluir los trabajos, desarrollo de contenidos y acciones inmediatas en caso de accidente.*

- *Los procedimientos generales establecen las pautas que deben respetar los integrantes del plantel de mantenimiento; los procedimientos específicos, en cambio, están relacionados con actividades puntuales como soldadura, desconexión de equipos, fumistería, trabajos en tanques y cañerías presurizadas, tareas predictivas como gammagrafía y termografía, maniobras eléctricas, etc.*

Capítulo 9

Gestión de Repuestos

Compra solamente lo necesario, no lo conveniente. Lo innecesario, aunque cueste sólo un céntimo, es caro[1].

---

1 Lucio Anneo Séneca (~1 - 65).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Entender la importancia que tienen los repuestos en las actividades de mantenimiento.
- √ Comprender los objetivos de la gestión de inventarios.
- √ Cuantificar el nivel de existencias inmovilizadas.
- √ Reconocer las ventajas competitivas de los sistemas informáticos de gestión de stocks.
- √ Conocer los métodos y estructuras de catalogación más utilizados.
- √ Establecer niveles óptimos de existencias para garantizar la disponibilidad de repuestos y reducir el capital de trabajo.
- √ Entender la relación funcional del Almacén con otras áreas de la organización.
- √ Aplicar métodos sencillos para realizar auditorías de inventario.

Índice de Contenidos

9.1 Introducción
  Objetivos del Almacén de Repuestos
  Clasificación del Inventario

9.2 Sistemas de Gestión de Stocks (SGS)
  Módulos de un SGS
  Parámetros de Control de Stock

9.3 Nivel Óptimo de Existencias
  Modelo Determinista o del Punto de Pedido
  Modelo Probabilístico
  Modelo de Aprovisionamiento JIT (Just in Time)

9.4 Gestión del Almacén de Repuestos
  Relación del Almacén con otras áreas
  Criterios de almacenamiento
  Auditorias de Inventario
  Estandarización y Obsolescencia
  Indicadores de Gestión de Inventario

Resumen de aplicación

9.1 Introducción

La administración de repuestos y materiales es una actividad cuyo profesionalismo beneficia al mantenimiento y a la economía de la compañía. Una buena gestión de Repuestos optimiza el nivel de inventarios y reduce el riesgo de sufrir desabastecimientos.

Deben satisfacerse dos objetivos aparentemente opuestos. El primero, asegurar la máxima disponibilidad de los repuestos en todo momento, lo cual tendería a incrementar la reserva total promedio (*tener mucho para que nunca falte*); el segundo, reducir a la mínima cantidad las reservas inmovilizadas que significan capital ocioso, pero sin aumentar el costo administrativo de compra y logística (*tener poco para que nunca sobre*). Para encontrar un equilibrio entre ambos objetivos se utilizan modelos específicos de análisis y decisión. A su vez, el departamento de mantenimiento, con políticas y estrategias acertadas, puede reducir el consumo de repuestos (demanda) y el stock[1] inmovilizado sin perjudicar la disponibilidad de los equipos de Planta.

Hay soluciones informáticas capaces de administrar gran cantidad de ítems simultáneamente, que permiten parametrizar los repuestos individualmente y someterlos a una estrategia de reposición específica.

El modelo funcional (estructura y funciones) de un Almacén depende del tamaño y tipo empresa, y de la estructura dispuesta para Mantenimiento. En organizaciones de gran tamaño puede existir un Almacén Central y pequeñas Almacenes estratégicamente localizadas según las necesidades de abastecimiento de cada zona. Una política global de inventarios deberá contemplar la descentralización física de áreas y la administración conjunta y corporativa de repuestos.

9.1.1 Objetivos del Almacén de Repuestos

Cada vez más, las áreas destinadas al almacenamiento y abastecimiento de repuestos cobran mayor importancia. Como en muchas otras profesiones, se abandonaron criterios empíricos y se están incorporando conceptos teóricos y matemáticos que logran el mayor beneficio global entre Máxima Disponibilidad y Mínimo Nivel de Existencia.

Todo almacén tiene, al menos, los siguientes objetivos de índole general:

- √ Suministrar los ítems (repuestos y materiales) de manera rápida.
- √ Reducir al mínimo posible el nivel de existencias (stock).
- √ Evitar el deterioro de los ítems almacenados.
- √ Impedir la compra y almacenamiento de repuestos obsoletos.

9.1.2 Clasificación del Inventario

Si bien hay modelos de referencia para clasificar piezas y repuestos que pueden emularse, cada empresa debe adoptar aquel que le brinde los mejores beneficios. En primer lugar hay que clasificar los materiales en función de algún criterio. Una forma de hacerlo es la siguiente:

- √ **Artículos Generales**. Este grupo incluye tornillos, tuercas, alambres, pinturas, gomas, candados, bolsas, remaches, adhesivos, etc. Son ítems de consumo masivo y de fácil obtención en el mercado. Algunos de ellos son, además, de alta rotación.
- √ **Herramientas**. Es conveniente separar las herramientas de los artículos generales. Por lo general, son de mayor costo y poseen mayor precisión constructiva, lo que les merece un tratamiento particular. Caen dentro de este grupo las llaves, mechas, machos, terrajas, calibres, cintas métricas, destornilladores, pinzas, limas, etc. Sin bien no es conveniente tener gran reserva (por su alto costo, baja rotación y, generalmente, fácil obtención en el mercado), puede ser útil asignar una pequeña área que contenga algunas herramientas. No debe confundirse la gestión de esta clase de ítems *nuevos* a cargo del Almacén con los depósitos o *pañoles de herramientas*. Ver apartado 9.2.1.7.
- √ **Suministros / Consumibles**. Se utilizan de forma generalizada en muchas aplicaciones. Incluyen lubricantes, solventes, combustibles, filtros, electrodos, barras metálicas, chapas, perfiles, discos de corte, polvos absorbentes, trapos, etc.
- √ **Repuestos Universales**. Son repuestos genéricos instalados en varios equipos de la Planta. Se incluyen los rodamientos, empaquetaduras, sellos mecánicos, juntas, válvulas, retenes, contactores, relés,

---

1 Stock: Cantidad, nivel de existencia o reserva de un material que se encuentra a la espera de ser utilizado.

disyuntores, lámparas, etc. Habitualmente son varios los proveedores capaces de entregar esta clase de repuestos a corto plazo.

√ **Repuestos Específicos**. Son aquellos repuestos propios de un diseño específico que, en principio, no pueden sustituirse con repuestos universales. Por lo general, el suministro lo realiza el fabricante del equipo a través de representantes o proveedores designados. Son repuestos específicos las partes estructurales, los engranajes, cojinetes, piezas de precisión, mecanismos, etc. También puede haber repuestos específicos comunes a más de un activo e intercambiables entre sí como ser, motores, acoplamientos hidráulicos, reductores de velocidad, rotores, plaquetas electrónicas, etc. Incluso algunos llegan a tomar la entidad de *equipo* en el sistema informático de mantenimiento (SIM).

√ **Conjuntos**. Son agrupaciones de elementos ensamblados (subsistemas) que tienen la característica de ser fácilmente intercambiables. Se utilizan subconjuntos para reducir el tiempo medio de reparación (MTTR) del equipo *padre*. Una vez reparados (en el taller de la empresa o en talleres externos) vuelven al Almacén.

Cualquiera sea la clase de ítem (artículo, consumible, repuesto específico, repuesto universal, etc.) debe codificarse. La catalogación de material técnico comienza asignando un código numérico a cada uno. La codificación numérica es la más difundida porque permite administrar gran cantidad y variedad de ítems. La figura 9.1.1 ilustra un ejemplo de codificación numérica.

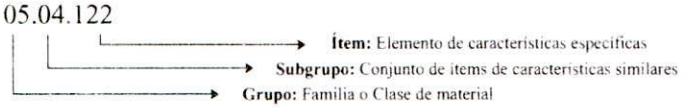


Figura 9.1.1
Sistema numérico de codificación para ítems de stock.

Por lo general se adoptan tres grupos de números. El primer grupo - de dos dígitos - identifica la familia o clase de repuesto. Así, habrá un *Número de Grupo* para los rodamientos, otro para los artículos de ferretería, otro para los lubricantes, etc. Ver tabla de la figura 9.1.2.

Gupo	Denominación
00	HERRAMIENTAS - ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y OPERACIÓN
01	BULONERÍA - ALAMBRES - MALLAS - CABLES DE ACERO
02	PINTURAS - ABRASIVOS - CEPILLOS - PEGAMENTOS - VIDRIOS
03	ACOPLAMIENTOS - POLEAS - CORREAS - CADENAS TRANSMISIÓN
04	CAÑOS - ACCESORIOS - BRIDAS - MANGUERAS - CONECTORES
05	RODAMIENTOS Y ACCESORIOS
06	RETENES - "O-RING" - JUNTAS - EMPAQUETADURAS - AISLANTES
07	PERFILERÍA - CHAPAS - FERROSOS Y NO FERROSOS
08	LUBRICANTES Y ACCESORIOS
09	REFRACTARIOS - MADERAS - MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN
10	VÁLVULAS Y REPUESTOS - TRAMPAS - ELEMENTOS C/INCENDIO
11	BOMBAS Y REPUESTOS
12	REDUCTORES Y REPUESTOS - ENGRANAJES
13	MÁQUINAS ELÉCTRICAS - FUENTES - CONTROL DE ENERGÍA
14	CABLES Y ACCESORIOS P/CABLES
15	CONDUCTOS ELÉCTRICOS Y ACCESORIOS
16	TABLEROS - GABINETES - ELEMENTOS DE COMANDO
17	ILUMINACIÓN
18	ELEMENTOS DE MEDICIÓN - COMPONENTES
19	COMPONENTES ELÉCTRICOS - TELEFONÍA
20	INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
21	REPUESTOS DE AUTOELEVADORES
22	REPUESTOS DE COMPRESORES
23	REPUESTOS DE AUTOELEVADORES ELÉCTRICOS
24	VESTIMENTA - ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL
25	OFICINA - ÚTILES E INSUMOS PARA EQUIPOS
26	PRODUCTOS PARA TRATAMIENTO DE AGUA - CALDERAS
27	INSUMOS DE COMPUTACIÓN
28	FILTROS
29	ELEMENTOS DE JARDINERÍA
30	GASES
31	REPUESTOS E INSUMOS DIVERSOS
32	SEGURIDAD E HIGIENE
33	ELEMENTOS PARA LIMPIEZA
34	ELEMENTOS DE LABORATORIO
99	GRUPO DE PRUEBAS

Figura 9.1.2
Lista de grupos para catalogación de material técnico.

Luego, encontramos el *Número de Subgrupo* – también de dos dígitos – que establece una subdivisión dentro del grupo. El subgrupo agrupa los elementos que tienen alguna característica particular dentro del grupo. Por ejemplo, para los rodamientos (Grupo 05 de la tabla anterior) habrá un subgrupo para los *radiales rígidos de 1 y 2 hileras de bolas*, otro para los *oscilantes*, etc. La figura 9.1.3 muestra dos ejemplos de apertura de grupos en subgrupos.

Gupo	Subgrupo	Denominación
05		RODAMIENTOS Y ACCESORIOS
	01	ROD. RADIALES RÍGIDOS DE 1 Y 2 HILERAS DE BOLAS
	04	ROD. RADIALES DE CONTACTO ANGULAR DE 1 Y 2 HILERAS DE BOLAS
	07	ROD. OSCILANTES (A RÓTULA) DE 1 Y 2 HILERAS DE BOLAS
	09	ROD. DE RODILLOS CILÍND. DE 1 Y 2 HILERAS C/AROS ANGULARES
	11	ROD. DE RODILLOS CÓNICOS
	13	ROD. OSCILANTES (A RÓTULA) DE 1 Y 2 HILERAS DE RODILLOS
	16	ROD. AXIALES DE BOLAS: SIMPLE Y DOBLE EFECTO
	17	CORONAS AXIALES DE AGUJAS - DISCOS AXIALES
	19	CORONAS Y CASQUILLOS DE AGUJAS
	21	RODAMIENTOS DE AGUJAS
	22	RODAMIENTOS COMBINADOS RADIALES Y AXIALES
	23	RODAMIENTOS TIPO "Y"
	24	RODAMIENTOS "S"
	25	SOPORTE CON RODAMIENTO
	29	SOPORTE PARA RODAMIENTO
	35	RÓTULAS Y RÓTULAS CON VASTAGO
	37	RODAMIENTOS LINEALES Y ACCESORIOS
	39	MANGUITOS PARA RODAMIENTOS
	43	RODAMIENTOS DESMONTABLES DE BOLAS
	46	BOLILLAS - AGUJAS - RODILLOS - ANILLOS
	49	RODILLOS DE APOYO - RODILLOS DE LEVAS
	52	BUJES
	55	OBTURADORES

Gupo	Subgrupo	Denominación
12		BOMBAS Y REPUESTOS
	01	BOMBAS
	02	REPUESTOS PARA BOMBAS
	03	EJES DE BOMBAS
	04	BUJES DE BOMBAS
	05	CAJAS DE EMPAQUETADURA DE BOMBAS
	06	PIEZAS MECANIZADAS DE BOMBAS
	07	TAPAS Y CONTRATAPAS DE BOMBAS
	08	CUERPOS DE BOMBAS
	09	ROTORES DE BOMBAS
	10	CONSOLAS DE BOMBAS

Figura 9.1.3
Lista de subgrupos para catalogación de material técnico.

El código del repuesto se completa con tres dígitos correlativos que identifican unívocamente el material. El número 05.04.122 en la figura 9.1.1 puede corresponder, por ejemplo, al siguiente ítem catalogado:

05.04.122 RODAMIENTO DE 2 HILERAS DE BOLAS C/CONT. ANGULAR Ø NOM. AGUJERO(MM) 30, Ø EXT. NOMINAL (MM) 62, ANCHO (MM) 23.8, MARCA EQUIVALENTE SKF 3206 / FAG 3206BTVH, ORIGEN IMPORTADO, ÁNGULO DE CONTACTO 32° O 25°, DISEÑO ARO INT.1 PIEZA

Figura 9.1.4
Ejemplo de catalogación de un repuesto universal.

El párrafo de la figura 9.1.4 es la descripción del código de un rodamiento de contacto angular de una hilera de bolas. Sin embargo, el proceso de catalogación abarcará otros materiales más complejos como, por ejemplo, los repuestos específicos. Por tanto, hay que establecer de ante mano y para cada subgrupo, la mínima información que cualquier ítem dentro del subgrupo contendrá como parámetros de su clase; este formato de almacenamiento de información se denomina por *Plantilla*.

Habrá una plantilla para cada clase de rodamiento, válvula, tornillo, repuesto de bomba, cable, lubricante, etc. En los sistemas informáticos de catalogación y gestión de stocks (SGS) deben parametrizarse las plantillas antes de comenzar la codificación de los ítems. La información que puede contener una plantilla es la siguiente[1]:

√ Descripción breve (información básica utilizada para acelerar la búsqueda en el SGS).
√ Descripción de detalle (descripción más completa de las características del ítem).
√ Código asignado por el fabricante (N° de pieza).
√ Fabricante, marca o proveedor.
√ Unidad de medida o despacho.
√ Lista de características físicas o técnicas.
√ Número de serie.
√ Número y nombre del plano de fabricación.
√ Clase de Repuesto.

La figura 9.1.5 muestra una Plantilla para el subgrupo Válvulas Esféricas (10.24).

SUBGRUPO 10.24: VÁLVULAS ESFÉRICAS	
PARÁMETRO	PARÁMETRO
DESCRIPCIÓN BREVE:	JUNTAS:
DETALLE:	Ø ESFERA:
TIPO / MODELO:	SERIE:
TIPO DE EXTREMOS:	ALTA / BAJA PRESIÓN:
CUERPO Y TAPA:	MARCA / FABRICANTE:
ESFERA Y VÁSTAGO	MARCA EQUIVALENTE:
ASIENTO:	CÓDIGO DEL FABRICANTE:

Figura 9.1.5 Plantilla de información para catalogación.

Con el advenimiento de las nuevas bases de datos genéricas, y siendo que los proveedores hoy entregan la información técnica en formato electrónico, las tareas de catalogación de repuestos son más sencillas que en el pasado, cuando el trabajo de catalogación era prácticamente manual. Actualmente pueden migrarse gran cantidad de datos al SGS muy rápidamente.

Debe procurarse la mayor cantidad de ítems dentro del catálogo; es decir, *catalogados*. Esto beneficia enormemente el control y reposición de artículos. Cuanto mayor es la cantidad de repuestos sin código más serán las emergencias, que no hacen otra cosa que incrementar los costos de abastecimiento y las pérdidas de producción. Además, y por temor a que falte el ítem, se hacen grandes compras que aumentan la reserva inmovilizada promedio del Almacén.

El código del repuesto, junto a su descripción breve, debe adherirse en la ubicación física que ocupa el ítem (frente de gaveta, estante, cajón, etc.). Esto facilita su localización.

1 Reiteramos que la información de Plantilla depende de cada clase de repuesto.

9.2 Sistemas de Gestión de Stock (SGS)

El mercado ofrece gran diversidad de sistemas informáticos para gestionar el stock del material técnico. Se llaman sistemas de gestión de stock (SGS). Estos programas corren en red y son capaces de controlar el acceso simultáneo de muchas terminales, siendo esta última una característica necesaria cuando operan varios almacenes descentralizados. Hoy en día esto no es una limitación en casi ningún sistema, y los recursos informáticos gastados producen su retorno de inversión a corto plazo.

Con un SGS es posible, entre otras cosas, llevar un registro de existencias, administrar el material que sale de fábrica, gestionar el flujo de vales, efectuar análisis de reposición de los ítems que deben comprarse y conocer la ubicación física de cada repuesto.

9.2.1 Módulos de un SGS

Se describen a continuación los módulos más importantes de un sistema de gestión de stock.

9.2.1.1 Cálculo de Reposición (Revisión de Existencias)

Cuando es ejecutada, la función de este módulo coteja para cada ítem el punto de pedido[1] y el stock al momento del análisis. Si el stock del ítem es igual o menor al punto de pedido, alerta sobre la necesidad de comprar unidades en la cantidad indicada por el lote de compra. Dependiendo de cada SGS, y su programación, los algoritmos matemáticos tienen en cuenta el stock actual (S), el punto de pedido (PP), el stock de seguridad (SS), la demanda (D), el stock mínimo (SM), el stock máximo (SMA) y el lote de compra (L_C), entre otras variables[2].

Revisar el inventario y calcular el lote de compra de cada ítem es una tarea que puede realizar automáticamente el sistema. No obstante, las personas encargadas de emitir pedidos deben entender cabalmente el proceso y verificar posibles errores; sobre todo en lo referido a las unidades de medida. *¡No ha faltado ocasión para que en lugar de pedirse seis tubos de gas acetileno se pidieran seis docenas de tubos!*

Si el control de stock no es de *revisión continua* (se ejecuta a voluntad del usuario) el intervalo entre cada revisión y el lote de compra ajustado (L_{CA}) dependen, entre otras cosas, del ítem y del modelo utilizado para representar el comportamiento de su demanda (ver sección 9.3).

9.2.1.2 Materiales Fuera de Fábrica

La gestión de repuestos conlleva a la necesidad de contar con herramientas confiables para saber, en todo momento, si ciertos repuestos están o no fuera de la compañía.

En muchas organizaciones actuales el Almacén de Repuestos también cumple la función de administrar el circuito de algunos elementos (conjuntos o repuestos específicos) que se envían a talleres externos para su reparación. En ocasiones sucede que sólo un par de personas está al tanto de esta situación, pasa el tiempo y cuando el elemento se necesita, nadie sabe donde encontrarlo. Estos módulos controlan los repuestos enviados fuera de fábrica con gran facilidad.

9.2.1.3 Pedido de Materiales

El departamento de Compras y el Almacén de Repuestos son áreas de máxima interacción y, por lo general, responden a distintas Gerencias. Mientras Compras suele pertenecer a la Gerencia de Abastecimiento, el Almacén responde a la de Mantenimiento. Su cercanía en la cadena de suministros hace que deban interactuar casi a diario.

Los sistemas de administración de inventarios tienen un módulo de Pedido o Requisición de Materiales que permite emitir solicitudes de compra al departamento de Compras, el que luego emitirá y enviará las Órdenes de Compra a los proveedores. Una vez efectuados los cálculos de reposición, se confeccionan las solicitudes de materiales (pedidos de compra). Un pedido es una lista con el código de cada repuesto, la descripción, cantidad, fecha de entrega prevista y el centro de costo[3].

Cualquiera sean los niveles de aprobación vigentes en la empresa, debe existir un circuito administrativo eficiente para asegurar que los repuestos estén en fábrica en el plazo previsto.

9.2.1.4 Recepción de Materiales

Se trata de una etapa importante en el proceso de gestión de inventarios. Por un lado hay que controlar la calidad del material entregado por el proveedor, aceptando o rechazando el pedido (o parte de él) según

---

1 El punto de pedido (o de reorden) es un parámetro programable que indica la cantidad de unidades de un ítem a la que debe emitirse un Pedido de Compra.

2 Los cálculos relacionados con los parámetros de control de stock mencionados, se desarrollan en la Sección 9.3.

3 Algunos modelos contables imputan los gastos por la compra de materiales directamente a los centros productivos. Otros, en cambio, imputan las compras a un centro de costo de Almacén y luego, de acuerdo al consumo, a los centros de costos demandantes.

algún estándar establecido. Por otro, recepcionar los remitos, cotejarlos con la Órden de Compra e ingresar la cantidad recibida de cada ítem en el sistema

En ocasiones la formación técnica o experiencia del personal de Almacén no es suficiente para decidir la aprobación de un material, por lo que debe solicitarse apoyo a los Supervisores o Jefes de Mantenimiento. Este puede ser el caso de los repuestos específicos complejos.

9.2.1.5 Despacho de Materiales

Cuando los usuarios de mantenimiento o producción desean retirar materiales del Almacén, confeccionan un *Vale de Retiro de Materiales* (VRM) que indica la Órden de Trabajo (OT) en la que se usarán los mismos. El vale deberá estar aprobado por un Supervisor autorizado.

El vale se entrega al despachante quien, luego de hacer la entrega correspondiente de la mercadería, lo ingresa al SGS para que se actualicen los registros de existencias (stocks) y se impute el gasto a la OT. Esto permitirá conocer el gasto por equipo y por centro de costo.

Hoy en día los vales se emiten en formato electrónico desde el mismo SIM[1], y el registro de despacho automático puede hacerse con un lector de códigos de barras.

9.2.1.6 Devolución de Materiales

En algunas circunstancias los materiales deben devolverse; para lo cual se emite un *Vale de Devolución de Materiales* (VDM) contra la misma OT que había recibido la imputación del retiro, y se entrega el repuesto al Almacén. El ítem debe estar en óptimas condiciones para ser ingresado nuevamente al stock como devolución de consumo.

9.2.1.7 Pañol de Herramientas

Sea que el manejo de herramientas especiales se administre desde Mantenimiento o desde el Almacén, lo cierto es que los sistemas de mantenimiento y gestión de stocks contemplan la posibilidad de administrar uno o más Pañoles de Herramientas.

Un Pañol es un recinto cercano a las áreas de trabajo para albergar herramientas de uso común a todos los colaboradores del taller. Es frecuente que haya un Pañol en organizaciones de gran tamaño con muchos trabajadores en el área. Habitualmente los mantenedores tienen a su cargo solamente un mínimo de *herramientas de caja*, pero hay otras herramientas que sería imposible tener una para cada empleado. Estas últimas son las que se destinan al Pañol.

Son herramientas de pañol los extractores, elevadores hidráulicos, llaves de fuerza, llaves de impacto, estrobos, mechas, amoladoras, o cualquier otra máquina o herramienta específica.

El módulo permite asignar a cada trabajador un conjunto de herramientas, tanto de manera permanente (a cargo del colaborador) como en carácter de préstamo (despachos del pañol). El registro de elementos devueltos por daño, rotura o pérdida también se administra desde esta función del sistema.

9.2.2 Parámetros de Control de Stock

Los parámetros de control de stock son datos que se asocian a cada ítem para que el sistema realice las operaciones de gestión automáticamente. Debemos entender que el tiempo invertido en definir estos parámetros, traerá beneficios en muchos aspectos. En primer lugar hará más ordenada la búsqueda en el sistema. Sin embargo, el máximo beneficio es que en Almacén estarán sólo los repuestos necesarios y en las cantidades correctas.

A continuación se muestra una lista de parámetros que debería contener cada ítem.

- √ Ubicación física dentro del Almacén[2].
- √ Grado de rotación (alta, media o baja).
- √ Estrategia de mantenimiento (si se requiere para su conservación en el depósito).
- √ Modelo de Reposición.
- √ Cantidad instalada en Planta (para repuestos específicos de baja rotación).
- √ Lista de equipos en los que está instalado (para repuestos específicos de baja rotación).
- √ Stock mínimo (SM), stock máximo (SMA), stock de seguridad (SS), punto de pedido (PP) ó reorden, lote de compra (L_C), etc.

---

1 En casi todos los casos el Sistema de Gestión de Stock (SGS) está vinculado al Sistema de Mantenimiento (SIM) a través de una interfase; o bien, es un módulo que forma parte de la misma aplicación.

2 Suele usarse un código interno constituido por números y letras para indicar el sector, cuerpo, estantería, gaveta o cajón que ocupa la mercadería.

9.3 Nivel Óptimo de Existencias

Al inicio del Capítulo se mencionaron dos objetivos principales en la Gestión de Repuestos.

√ Suministrar los ítems rápidamente (disponibilidad inmediata) ante una falla o necesidad.
√ Reducir al mínimo posible el nivel de existencias (stock).

El primero de los objetivos pretende evitar que se interrumpa el proceso productivo para que la organización continúe produciendo beneficios; el segundo, intenta reducir el stock inmovilizado (capital ocioso) hasta los límites permitidos por el costo de adquirir dichos bienes.

La experiencia indica que es conveniente comenzar el proceso de optimización de inventarios haciendo, previamente, un estudio ABC de todos los repuestos del Almacén[1]. El método es sencillo y consiste en graficar el porcentaje de aporte monetario que cada familia de repuestos hace al total del inventario valorizado (100%). Se listan descendentemente estos porcentajes por familia y se ubican en el eje de ordenadas; en abscisas, se representa el porcentaje de ítems que cada familia tiene con respecto al total del inventario. Sólo es preciso contar con un listado valorizado de todos los ítems y una planilla de cálculo.

El conjunto de repuestos (normalmente no mayor al 20% del total) que representen entre el 70 y el 80% del valor total del inventario, formarán el grupo A. El grupo B es aquel constituido por los repuestos que completan el 95% del valor monetario total del inventario. Se deja el resto de los ítems (alrededor del 5% del valor total) para constituir el grupo C, cuya cantidad superará seguramente el 60% del total de los ítems.

Estos porcentajes son orientativos, pudiendo variar en función del tipo de inventario.

En un Almacén típica de Mantenimiento muy posiblemente entrarán en el grupo C las tuercas, tornillos, arandelas, clavos, lijas u otros artículos de uso general. En el grupo B, tal vez habrá retenes, correas, rodamientos, relés, contactores, cables, lubricantes, filtros, etc. Finalmente en el grupo A, estarán los repuestos específicos y universales de mayor valor económico.

Los cálculos para determinar los niveles óptimos de existencias y los parámetros de control de stock que los regulan, deben respetar el orden ABC; vale decir que, primero debemos resolver el conflicto entre *Máxima Disponibilidad* y *Mínima Existencia* para los repuestos del grupo A y luego hacer lo propio con los repuestos de los grupos B y C respectivamente.

Para encontrar el equilibrio entre ambos objetivos debemos determinar el *modelo de control de inventario* aplicable a cada ítem. En tal sentido, presentamos aquí dos posibles alternativas; una conocida generalmente como modelo *determinista*; la otra como modelo *probabilístico*.

Los repuestos que responden satisfactoriamente al modelo determinista aquí presentado, se los llama de *Demanda Conocida*; los que se ajustan al modelo probabilístico, se conocen como de *Demanda Incierta*.

9.3.1 Modelo Determinista o del Punto de Pedido

Se dice que un repuesto (ítem) tiene Demanda Conocida si puede establecerse, con bastante exactitud, el patrón de consumo que tendrá durante algún tiempo. El patrón de consumo futuro asumido para el repuesto, así como el comportamiento de las otras variables que gobiernan el modelo, se basan en datos históricos. Pero es justamente la evidencia histórica la que refleja que es poco probable que en el futuro las consideraciones asumidas se cumplan estrictamente. El modelo determinista, que en rigor ignora la aleatoriedad de las variables, debe complementarse entonces con adaptaciones que permitan su aplicación y la obtención de buenos resultados prácticos.

El modelo usado para definir la estrategia de reposición de inventarios, desde el punto de vista determinista, se conoce también como de *Reposición por Punto de Pedido*, y el cumplimiento de los objetivos propuestos (*Máxima Disponibilidad* y *Mínima Existencia*) se materializa al responder las siguientes dos preguntas:

√ *¿Qué cantidad solicitar en cada pedido?*
√ *¿Cuándo hacer el pedido?*

---

1 Es posible también hacer un estudio de Demanda Valorizada ordenando en forma decreciente los productos de la demanda anual de cada ítem por su precio unitario. La optimización debe comenzar por los ítems de mayor Demanda Valorizada.

Supóngase una clase de rodamiento con varias aplicaciones en Planta. La historia de consumo revela que en el último año se consumieron 5, 3, 5, 6, 7, 5, 4, 5, 7, 4, 5 y 4 unidades por mes. Nadie estaría equivocado al pensar que la demanda no es del todo previsible ni regular. No obstante, veremos que tomando algunos recaudos, el modelo puede aplicarse muy bien.

Un patrón de consumo como el indicado (*demanda conocida continua*) es propio de repuestos de alta rotación que, si bien cada aplicación no tiene un comportamiento del todo previsible, sí lo tiene el conjunto, pues podemos afirmar que la demanda media mensual es 5 unidades con una dispersión no muy alta.

Otro caso de demanda conocida son aquellos repuestos que certeramente se sabe serán sustituidos a intervalos fijos (*demanda conocida discreta*). Los repuestos específicos de baja rotación incluidos en los planes de mantenimiento preventivo, responden bien a este modelo.

Podrían ser, entonces, repuestos de demanda conocida los enumerados a continuación.

√ Rodamientos, válvulas, correas de transmisión, contactores de uso frecuente, etc.
√ Elementos de ferretería (clavos, tornillos, adhesivos, fusibles, etc.).
√ Consumibles como lubricantes, solventes, adsorbente industrial, etc.
√ Repuestos de bombas, sellos mecánicos o impulsores.
√ Repuestos específicos de equipos sometidos a Mantenimiento Preventivo.

Para entender este modelo obsérvese la figura 9.3.1 que hace referencia al caso propuesto de los rodamientos. La recta D representa la tasa de demanda que, en promedio, es de 5 unidades por mes ($D_{Promedio}$ = 5 unidades/mes). El tiempo de reposición o aprovisionamiento total (que incluye al plazo de entrega) es t_{TA} = 30 días.

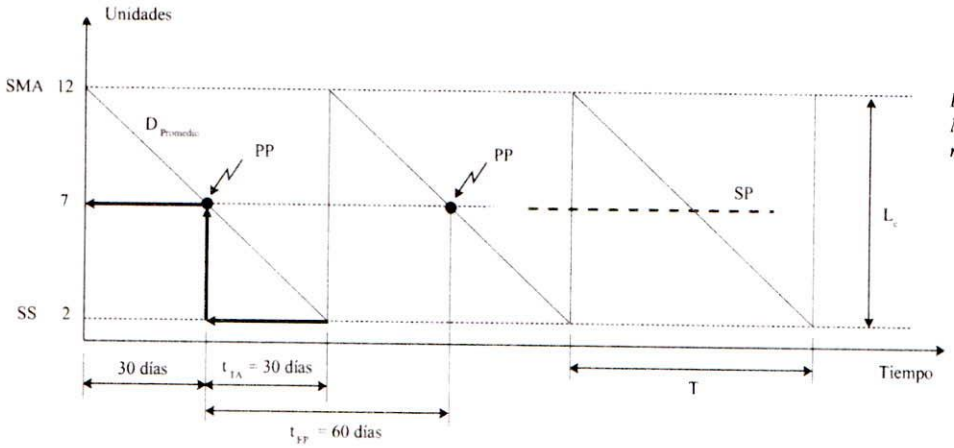


Figura 9.3.1 Modelo de demanda conocida.

La línea punteada ubicada en 2 unidades representa el stock de seguridad (SS) que aquí se fijó arbitrariamente. El punto de pedido (PP) se obtiene gráficamente retrocediendo un período equivalente al tiempo total de aprovisionamiento (30 días) desde la intersección de la demanda con el stock de seguridad y luego ascendiendo hasta intersectar la curva de demanda; las unidades que a esa altura se proyectan sobre el eje de ordenadas es la cantidad correspondiente al punto de pedido que, en este ejemplo, resultan ser 7 unidades.

Cuando la cantidad almacenada del ítem alcance las 7 unidades se debería emitir un nuevo pedido de compra cuya cantidad es L_C (10 unidades) según muestra la figura. Siendo que el nuevo pedido tarda en llegar un tiempo t_{TA} mientras sigue actuando la demanda, justo antes de cruzar el límite impuesto por el stock de seguridad estaría llegando el pedido que elevaría el stock máximo nuevamente a 12 unidades. Si la demanda se mantiene estable (pendiente de la recta D), el ciclo se repite regularmente.

El intervalo de tiempo entre dos pedidos consecutivos (t_{EP}), que además coincide con el período T, es 60 días; lo que equivale a decir que, para satisfacer la demanda de este ítem, se precisarían hacer 6 pedidos al año. Del gráfico también se desprende que el inventario o stock promedio (SP) a lo largo del año es 7 unidades y que depende del stock de seguridad (SS) y del lote de compra (L_C).

$$SP = SS + L_C / 2 \qquad 9.3.1$$

Así, calculando y valorizando el stock promedio de todos los ítems, puede estimarse el capital inmovilizado promedio del total de existencias presentes en un Almacén de Repuestos.

Plantear un stock de seguridad es parte de las adaptaciones propuestas al modelo determinista y es una forma de compensar las fluctuaciones adversas de la demanda y los retrasos en la cadena de suministro; es decir, amortiguar sus aleatoriedades.

Si bien es cierto que este recurso incrementa el stock promedio (y por consiguiente el dinero inmovilizado), lamentablemente es necesario porque casi nunca la demanda es totalmente previsible (hay picos aleatorios de consumo) y casi nunca el tiempo total de aprovisionamiento (incluido el plazo de entrega) se cumple estrictamente por los retrasos en el circuito *pedido - compra - entrega.*

La ecuación 9.3.2 tiene en cuenta ambos factores.

$$SS = \underbrace{D_{Máxima\ (t_{TA})} - D_{Promedio\ (t_{TA})}}_{\text{Amortiguación por variación en la demanda}} + \underbrace{[(t_{TA\ Máximo} - t_{TA\ Promedio}) \cdot D_{Promedio}]}_{\text{Amortiguación por variación en el tiempo total de aprovisionamiento}} \qquad 9.3.2[1]$$

El término $D_{Máxima\ (tTA)}$ es la máxima demanda durante un intervalo equivalente al t_{TA} y $D_{Promedio\ (tTA)}$, la demanda promedio del mismo intervalo. Por su parte, $t_{TA\ Máximo}$ es el máximo tiempo total de aprovisionamiento y $t_{TA\ Promedio}$ el tiempo total de aprovisionamiento promedio.

El valor $D_{Promedio}$ es la demanda promedio del repuesto. Todos los valores basados en datos históricos.

Para los casos en que t_{TA} no sufre variaciones significativas, es suficiente con considerar:

$$SS = D_{Máxima\ (tTA)} - D_{Promedio(tTA)} \qquad 9.3.3$$

Obsérvese que cuanto más uniforme es la demanda (menor variabilidad) menor tendrá que ser el stock de seguridad y, por tanto, menor será el stock promedio. Por lo tanto, es importante la labor de Mantenimiento en cuanto a *planchar* la demanda lo más posible tratando de conferirle previsibilidad y regularidad al consumo de repuestos.

NOTA: El tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}) incluye, además del plazo de entrega (PE) propio del proveedor, el tiempo correspondiente a la emisión del pedido (circuito de aprobación y firma), el tiempo de espera hasta que el pedido llega al departamento de compras, el tiempo que demora en emitirse la Orden de Compra (OC) y el tiempo que podría estar el material a la espera de algún control de calidad antes de ingresar a la estantería, si fuese el caso; vale decir, todo el tiempo que transcurre desde que el stock llega al punto de pedido (PP) hasta que el repuesto está nuevamente disponible en la estantería para su uso.

En las ecuaciones 9.3.2 y 9.3.3 puede advertirse que cuanto menor y, sobre todo, más previsible es el tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}), menor será el stock de seguridad (SS).

Una alternativa para estimar el stock de seguridad, es utilizar el concepto de *Nivel de Servicio* (N_S) y desviación estándar de la demanda (σ_D), cuya expresión es:

$$SS = C_{Ns} \cdot \sqrt{PE} \cdot \sigma_D \qquad 9.3.4$$

El coeficiente asociado a cada nivel de servicio deseado (C_{Ns}) puede obtenerse de la siguiente tabla normalizada, en la que N_S [%] es 1 - probabilidad tolerada de que falte el repuesto.

---

1 Las ecuaciones 9.3.2 y 9.3.3 fueron extraídas de los seminarios dictados por la firma MA Consultora ®.

N_S[%]	C_{Ns}
99,5%	2,58
99,0%	2,33
97,5%	1,96
95,0%	1,65

Tabla 9.3.1
Tabla normalizada para seleccionar el Coeficiente de Nivel de Servicio.

Volviendo al ejemplo de los rodamientos, en el que se diera el consumo histórico de 12 meses, el stock de seguridad sería 2 unidades según la ecuación 9.3.2 (asumiendo variación nula del t_{TA}). Sin embargo, si la demanda fuese 5, 4, 6, 6, 6, 5, 4, 5, 6, 4, 5 y 4 (varían sólo algunos consumos puntuales), el stock de seguridad ascendería a 1 unidad.

Cuanto mayor es la incertidumbre en la demanda, mayor será el inventario inmovilizado.

El punto de pedido (PP) y el intervalo entre pedidos (t_{EP}) quedan establecidos analíticamente según las ecuaciones 9.3.5 y 9.3.6 respectivamente.

$$PP = SS + (t_{TA} \cdot D_{Promedio}) \qquad 9.3.5$$

$$t_{EP} = (L_C / D_{Promedio}) = T \qquad 9.3.6$$

Donde $D_{Promedio}$ es la demanda media.

En la figura 9.3.1 el lote de compra (L_C) es 10 unidades y el stock máximo (SMA) se eleva a 12 unidades ¿Que ocurriría si el lote de compra se redujese a 7? La figura siguiente ilustra el mismo modelo con el lote de compra y el stock máximo reducidos.

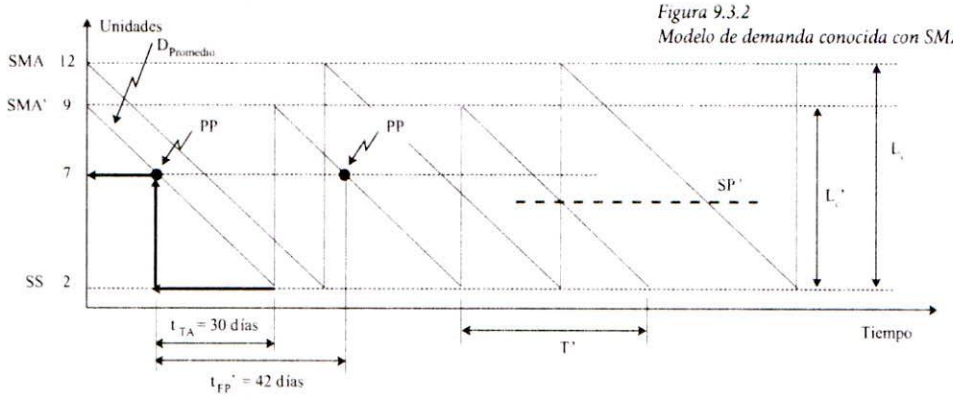


Figura 9.3.2
Modelo de demanda conocida con SMA reducido.

La reducción del lote de compra también disminuye el stock máximo a 9 unidades (SMA') y el stock promedio a 5,5 (verifique con la ecuación 9.3.1). La pendiente de la recta D no cambia porque la tasa de demanda se mantiene en 5 unidades mensuales. El punto de pedido sigue siendo 7 porque depende de variables que, en este ejemplo, no se han alterado. Sin embargo, la mayor consecuencia es sobre el intervalo entre pedidos (t_{EP}) que se reduce de 60 a 42 días (1,4 meses) según resulta de la ecuación 9.3.6. Esto significa que se deberán hacer más de 8 pedidos al año en lugar de los 6 previstos cuando el tamaño del lote de compra era 10 unidades. El resumen de los datos calculados se muestra en el cuadro siguiente.

SMA	L_C	SP	t_{EP} [días]	Pedidos/año	PP
12	10	7	60	6	7
9	7	5,5	42	≈ 8	7

Figura 9.3.3
Resumen de resultados.

Vemos entonces que reduciendo el lote de compra se reduce el stock promedio y, por tanto, el capital inmovilizado; pero aumenta la cantidad de pedidos, con el consecuente incremento del costo anual de la gestión de compra. Hacer más pedidos al año cuesta más dinero.

La relación más económica entre el costo de almacenar y el costo de comprar cada ítem, se obtiene a través de la ecuación 9.3.7[1] que define el lote óptimo de compra para cumplir con tal condición.

1 *Esta ecuación surge de encontrar el mínimo del costo total de adquirir y almacenar el ítem por unidad de tiempo. "Investigación de Operaciones" Hamdy A. Taha, página 567 Editorial Alfaomega.*

$$L_{C\,(Óptimo)} = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot D_{Anual}}{H}} \qquad 9.3.7$$

Donde,

- √ $L_{C\,(Óptimo)}$ es la cantidad de unidades a comprar del ítem en cada pedido para obtener el menor costo total. También se conoce como Lote Económico de Wilson.
- √ K es el costo de la gestión de reponer (pedir, comprar, recibir y controlar) el ítem, y es independiente de la cantidad de unidades que se compran en cada pedido.
- √ D_{Anual} es la demanda anual del ítem.
- √ H es el costo anual de almacenaje por unidad.

Vemos que, en algún punto, se obtiene el costo total mínimo correspondiente al lote óptimo de compra $L_{C\,(Óptimo)}$, no necesariamente coincidente con la intersección de las curvas de Costo de Adquisición y Costo de Almacenamiento.

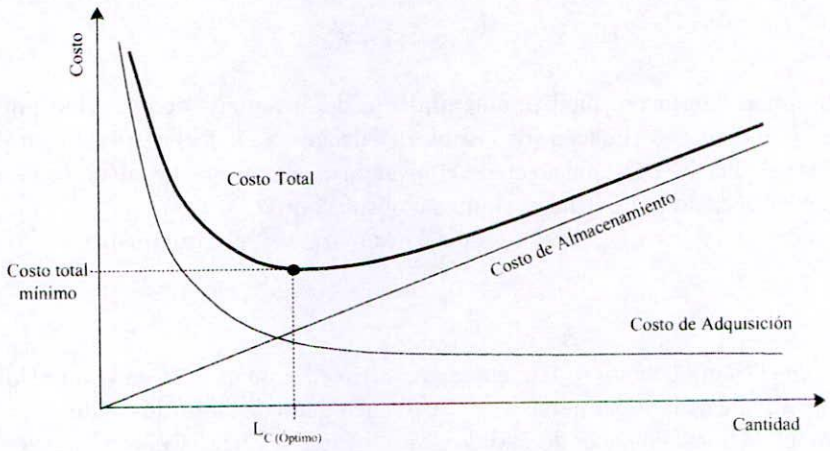


Figura 9.3.4
Variación de los costos asociados a la gestión de stocks.

Para estimar el costo de la gestión de compra (K), y con el fin único de definir el lote óptimo de compra, puede utilizarse la ecuación 9.3.8[1].

$$K = \frac{t\,C_{tr} + C_{ad} + [(HH_e + HH_r) \cdot C_{HH}]}{C_l} \qquad 9.3.8$$

C_{tr} es el costo fijo promedio de transporte (flete) que por cada pedido hay que abonar en caso que el suministro corra por cuenta del comprador (y si no varía con la cantidad a pedir). Si los costos asociados a la entrega de pedidos los absorbe por completo el proveedor, este factor es nulo. C_{ad} son los gastos fijos administrativos por pedido (teléfono, fax, insumos y otros gastos).

HH_e es la cantidad de horas hombre que en promedio insume gestionar un pedido (horas en Almacén + horas en Compras). HH_r son las horas hombre que en promedio se requieren para recibir un pedido (horas en Almacén + horas en Compras + horas en Pago a Proveedores). C_{HH} es el promedio de los costos de las horas hombre de las personas directamente involucradas en emitir, gestionar, recibir y pagar los pedidos de materiales en el Almacén, Compras y Pago a Proveedores.

Si el costo de las horas hombre de las distintas áreas tuviese mucha dispersión, el término entre corchetes puede reemplazarse por la suma de los productos de las horas hombre de cada sector y el costo unitario de cada hora. Finalmente, C_l es la cantidad media de filas (renglones) que integran un pedido de estas características. Se considera la cantidad media de filas por pedido, y no la cantidad media de unidades del ítem solicitadas por pedido, porque para pedir una sola unidad del ítem se precisa al menos una línea del pedido. En cada pedido podrán incorporarse varias filas (y más de una unidad del ítem por fila), por lo que el costo de reponer el ítem disminuye conforme aumenta la cantidad de filas por pedido.

---

1 Esta ecuación fue extraída de los seminarios dictados por la firma MA Consultora ®.

El factor K es importante porque de él depende directamente el lote de compra; y además:

- √ Es fácilmente estimable.
- √ Influye directamente en la merma de inventarios.
- √ No debe incluir el costo de la hora hombre de todas las personas que trabajan en las áreas de Almacén, Compras o Pago a Proveedores; sólo el de aquellas directamente implicadas en la gestión.
- √ Normalmente calculando algunos valores K, es suficiente para cubrir la gran mayoría de los repuestos de demanda predecible o conocida.
- √ Mal estimado, puede producir frecuentes desabastecimientos y/o elevar sustancialmente el stock promedio (dinero inmovilizado).

El costo de almacenaje (o tenencia) unitario H, puede calcularse directamente asumiendo un porcentaje del valor del ítem (entre 5 y 25%); o bien a través de:

$$H = V_i . (C_a / V_T + C_f) = V_i . f_H \qquad 9.3.9$$

C_a es el costo anual de acarreo total (mantenimiento del inventario) constituido por el costo de amortización de los activos del Almacén (depósitos, instalaciones, etc.), el costo de seguros e impuestos, el costo de los sueldos del personal afectado al inventario, el costo de los insumos necesarios para gestionar el Almacén, el costo por pérdidas, roturas u obsolescencia.

V_i es el valor unitario del ítem, V_T el valor total del inventario y C_f el costo financiero o tasa de interés anual.

Ejemplo 9.3.1

Supongamos que en el ejemplo de los rodamientos es el proveedor quien entrega siempre los pedidos de compra y que el precio de cada rodamiento es $340. El encargado de emitir los pedidos en el Almacén demora normalmente 3 horas en hacer un pedido de estas características, y el comprador otras 6 horas en colocar la Orden de Compra al proveedor. Considérense 3 horas más para recibir el pedido, ingresar al sistema de gestión de stock (SGS) los remitos y gestionar el pago de las facturas. El promedio de los valores de horas hombre se estima en $35. Los gastos administrativos se consideran despreciables.

Una solicitud de pedido contiene diferentes tipos de rodamientos entre los que se encuentra el que estamos analizando, y cada tipo de rodamiento constituye un ítem (línea) en la solicitud. En promedio este tipo de pedidos contiene alrededor de 15 líneas.

Utilizando las ecuaciones mencionadas y haciendo las cuentas, se tiene:

HH_e = 3 + 6 = 9 horas/pedido

HH_r = 3 horas/pedido

C_{HH} = 35 pesos/hora

C_i = 15 pedido^{-1}

D_{Anual} = 60 unidades/año

K = [(9 horas/pedido + 3 horas/pedido) x 35 pesos/hora] / 15 pedido^{-1} = 28 pesos

H = 340 pesos/unidad x 0,1 %/año = 34 pesos/unidad/año (se asume un 10% del valor del ítem)

$L_{c\ (Optimo)}$ = √ [2 x 28 pesos x 60 unidad/año / 34 pesos/unidad/año] ≈ 10 unidades

Queda analizar el caso en que el tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}) es mayor al tiempo t_{EP}, ver figura 9.3.1. La ecuación 9.3.5 es válida cuando $t_{TA} < t_{EP}$; es decir, cuando t_{TA} es menor a la relación $L_{C\,(Óptimo)} / D_{Promedio}$. Para el caso más general se tiene:

$$PP = SS + (t_{TA} \cdot D_{Promedio}) - (N \cdot L_{C\,(Óptimo)}) \qquad 9.3.10$$

Donde N es el entero más grande que no exceda la relación (t_{TA}/t_{EP})[1]. El punto de pedido de cada lote de compra se ubicará un tiempo t_{TA}/t_{EP} antes de su fecha deseada de recepción.

En el modelo determinista vemos que el lote de compra es independiente del plazo de entrega (PE), e incluso del tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}). Sin embargo, el stock de seguridad (SS) depende del tamaño y variabilidad del tiempo total de aprovisionamiento. El tamaño de t_{TA} influye en el primer término de la ecuación 9.3.2 siendo que cuanto mayor es éste, más se alejan los picos de demanda máxima y promedio. Por su parte, y en la misma ecuación, es fácil ver que la variabilidad influye en el segundo término.

Recuérdese que el tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}) no es únicamente el tiempo que tarda el proveedor en cumplir la Orden de Compra (PE); sino la suma de todos los tiempos, desde que el stock llega al punto de pedido hasta que éste está disponible en el Almacén. Si las estimaciones se basan en un valor fijo de t_{TA}, y luego la mercadería se retrasa, se corre el riesgo de sufrir desabastecimiento, lo que obliga a incrementar el stock de seguridad que a su vez aumentará el stock promedio del ítem. Si, por el contrario, los tiempos totales de aprovisionamiento son frecuentemente menores que los previstos, entonces el stock promedio también aumentará pues habrá stock innecesario antes del momento requerido.

Aplicación masiva del Modelo Determinista

El paquete de fórmulas vistas puede administrarse con bastante facilidad por medio de planillas de cálculo adecuadamente organizadas y programadas. Terminado el estudio ABC, deben seleccionarse los grupos de repuestos con características similares en cuanto a los costos de compra, con el fin de encontrar un valor K equivalente para todos. Esto simplifica enormemente los cálculos. Por ejemplo, casi siempre es posible hallar un único valor K para todos los rodamientos, retenes, correas, y otros repuestos similares.

Determinación del valor K para diferentes grupos de Repuestos						
	Datos					Resultados
Grupos	C_{tr}	HH_e	HH_r	C_{HH}	C_i	K_i
1						
2						
3						
4						
5						

Figura 9.3.5 Determinación del valor K para distintos grupos de repuestos.

Luego, se prepara una planilla de cálculo por cada grupo de ítems que tienen el mismo valor K, según ilustra la figura 9.3.6. Cada planilla se divide en dos partes; una, para completar con los datos de cálculo y, la otra, donde aparecerán los resultados. Los datos de cálculo pueden obtenerse del sistema informático de gestión a través de exportaciones masivas.

---

1 *"Investigación de Operaciones" Hamdy A. Taha, página 569 Editorial Alfaomega.*

K = K1	Determinación de parámetros de control de stock para Repuestos de Demanda Conocida																
	Datos								Resultados (⟶ orden de cálculo)								
Código del repuesto	Valor unitario	f_H	t_{TA} Máximo	t_{TA} Medio	D Anual	D Máxima(TA)	D Media(TA)	D Media	SS	H	L_c	t_{EP}	T	N	PP	SMA	SP

Figura 9.3.6
Determinación de los parámetros de control de stock para repuestos de demanda conocida.

Determinados los parámetros de cada ítem, deben cargarse en el sistema de gestión de stock. Dado que muchas consideraciones del modelo asumen que ciertas variables se mantienen constantes (demanda, costo del pedido, valor del ítem, etc.), o se alteran sólo en la medida de lo previsto, es imprescindible revisarlas periódicamente. Lo normal es actualizar anualmente los parámetros ya que, en ese lapso, pueden ocurrir cambios significativos en la demanda, en los precios o en la cadena de suministro.

La última cuestión a resolver por los administradores de inventarios, es el tipo de revisión; vale decir, el modo en que el sistema monitorea el stock y evalúa las necesidades de compra. En tal sentido, podemos mencionar dos tipos de Análisis de Reposición (AR): *continuos y discretos.*

En los análisis de reposición continuos (también llamados de *cantidad fija*) el sistema revisa continuamente el stock disponible. Si éste desciende y llega hasta el punto de pedido, alerta sobre la necesidad de generar un nuevo pedido de compra; incluso algunos disparan un pedido automáticamente. El lote de compra (fijo) es el Lote Económico, determinado por la ecuación 9.3.7. El intervalo entre pedidos esperado es t_{EP}, aunque podrá variar en función de la tasa de demanda. Esta clase de análisis de reposición garantiza el menor inventario inmovilizado.

Si no fuese posible aplicar un monitoreo continuo del stock, puede optarse por implementar análisis de reposición discretos (también llamados de *cantidad variable*). Los análisis de reposición discretos evalúan el stock (S) del repuesto sólo periódicamente a intervalos cuya frecuencia la establece el administrador. El intervalo de revisión fijo (I_r), económicamente más favorable, es directamente el tiempo entre pedidos (t_{EP}) dado por la ecuación 9.3.6 con $L_{C(Óptimo)}$. Cuando el operador dispara el análisis de reposición a intervalos I_r, el sistema verifica el stock (S) y lo compara con el stock máximo óptimo ($SMA_{Óptimo}$). El lote de compra ajustado (L_{CA}) surge de la diferencia entre éste y el stock al momento de la revisión.

$$SMA_{Óptimo} = SS + L_{C(Óptimo)} \qquad 9.3.11$$

$$L_{CA} = SMA_{Óptimo} - S \qquad 9.3.12$$

Si el intervalo I_r escogido para las revisiones fuese lo suficientemente grande como para poner en riesgo el stock de seguridad (SS), queda la alternativa más conservadora de incluir I_r dentro del tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}). En tal caso, el stock de seguridad se incrementará para asegurar la peor condición: *un instante después de la revisión, el consumo hace que el stock (S) llegue al punto de pedido (PP).*

Obsérvese que en los análisis de reposición discretos el intervalo entre revisiones (I_r) es fijo, mientras que varía el lote de compra en función del comportamiento del resto de las variables. Así, el stock máximo (SMA) y el stock promedio (SP) serán superiores a los establecidos en el modelo de revisión continua. Además, cuanto mayor sea el intervalo I_r adoptado para hacer los análisis de reposición con respecto al tiempo t_{EP}, mayor será el stock máximo y el stock promedio; vale decir, más nos alejamos del lote económico óptimo. **Revisar menos veces al año cuesta más capital inmovilizado.**

Se han desarrollado modelos dinámicos basados en la corrección automática, en manos del propio sistema, de las variables de control del stock. Su finalidad es evitar, o minimizar aún más, los quiebres de stock (consumir el stock de seguridad) y mantener en todo momento el nivel óptimo del inventario. En los modelos dinámicos de simulación, la demanda es conocida pero puede variar en los distintos períodos.

Resumen de pasos

Habiendo constituido un listado con el código, descripción y precio unitarios de cada ítem, se aplica la herramienta escogida para priorizar el análisis (método ABC o Demanda Valorizada). A partir de entonces, se recomienda seguir los siguientes pasos:

- √ Para los repuestos del grupo A, determinar cuáles son de Demanda Conocida.
- √ Agrupar los repuestos que se sabe tendrán similares valores K.
- √ Consolidar la información necesaria para completar la planilla de la figura 9.3.5 a través de la exportación masiva desde el SGS. Calcular el valor K para cada grupo de ítems.
- √ Proceder de la misma forma y completar los datos de la planilla indicada en la figura 9.3.6. El orden de los cálculos se muestra con una flecha en la parte *Resultados* de la planilla. Cada celda de Resultados contendrá la fórmula correspondiente.
- √ Cargar los resultados (parámetros de stock) en el SGS.
- √ Revisar periódicamente (al menos una vez al año) los parámetros calculados.
- √ Repetir los pasos anteriores para los repuestos pertenecientes al grupo B y C.

9.3.2 Modelo Probabilístico

En el modelo determinista la demanda se considera estable y se estima a partir del valor medio de los consumos históricos. A lo sumo, se asume cierta incertidumbre en la demanda (y/o tiempo total de aprovisionamiento) a través de las ecuaciones 9.3.2 y 9.3.3. Además, se descuida la penalización económica por la falta de unidades.

Pero el departamento de Mantenimiento se enfrenta a otras situaciones de mayor complejidad, provocadas por el valor elevado de algunos repuestos y su escasa demanda. Por ejemplo, hay repuestos específicos cuya demanda puede ser menor a una unidad por lustro. Incluso algunos tal vez no sean utilizados durante toda la vida del activo al que pertenecen. Tomar decisiones correctas bajo un contexto de riesgo[1], no es tarea sencilla.

Para estos repuestos, cuya demanda es aleatoria o incierta y que puede describirse por una función de densidad de probabilidades, es necesario aplicar modelos probabilísticos. Como se dijo, deben someterse a este modelo los ítems de muy baja rotación, alto precio y, a veces, con extensos plazos de entrega. Vale decir, algunos de los que integran el grupo A según al criterio ABC ya mencionado. No entran en este modelo aquellos repuestos de vida útil consistente.

El método probabilístico de único artículo define la cantidad (S) a tener de un ítem, o el stock máximo (SMA) a mantener, que satisface su demanda (incierta) para todo un intervalo de tiempo llamado horizonte de evaluación económica (H_{EE}) al mínimo costo global.

Si, por ejemplo, durante cierto período H_{EE} la demanda fuese considerablemente inferior al stock almacenado (figura 9.3.7 a), se habrán mantenido existencias por demás, incurriéndose en innecesarios costos de almacenaje y de capital inmovilizado. Por el contrario, si la demanda fuese superior a la cantidad almacenada (figura 9.3.7 b), se habrá sufrido algún perjuicio económico por desabastecimiento (escasez) que afectará desfavorablemente el negocio.

Tanto el riesgo de indisponibilidad por "quiebre o ruptura" de stock, como el riesgo de stock remanente, se cuantifican económicamente a través de una función de riesgo. El objetivo del modelo probabilístico de simulación es, entonces, encontrar una solución que brinde el menor costo global (más probable) entre diferentes alternativas; desde *no tener* el repuesto hasta *tenerlo y en distintas cantidades*. El hecho de tener el material en stock (con el costo financiero y de acarreo que significa) se justifica si las consecuencias económicas adversas asociadas al riesgo de no tenerlo, son más grandes que el costo por mantenerlo en el inventario.

---

1 Ver "Investigación de Operaciones" de Hamdy A. Taha página 481.

Nota: Es común llamar *críticos* a estos repuestos. Si bien es cierto que las consecuencias de no contar con suficiente stock suelen ser incómodas, no debemos caer en la creencia de que sólo por el hecho de ser un equipo *crítico* aquel que hace uso del ítem, hay una obligación casi sacrosanta de mantenerlo en stock. Tal decisión solamente debiera surgir del análisis costo beneficio proyectado según se describe más abajo, y no de apreciaciones subjetivas.

Sin perjuicio de lo dicho, Mantenimiento siempre debe estudiar los modos de falla del repuesto y proponer tareas de mantenimiento pro-activo que reduzcan su probabilidad de falla imprevista la que, en definitiva, encarece y carga de riesgo al proceso de toma de decisiones.

Consideraciones del Modelo Probabilístico

√ Se evalúa un único repuesto por cada análisis de decisión.
√ La demanda del repuesto (d) es independiente[1] y puede ser representada a través de una función de distribución de probabilidades p(d).
√ El horizonte de evaluación económica es único y vale H_{EE}.
√ El repuesto tiene un valor monetario de adquisición V_i.
√ El costo unitario por excedente para H_{EE} es C_{Ex} y depende de V_i.
√ Se ordena (compra) el repuesto por única vez al inicio del período H_{EE}.
√ La cantidad óptima a tener del ítem para todo H_{EE} es S (incógnita del problema).
√ Se produciría un impacto económico desfavorable (lucro cesante o penalización) por cada unidad faltante (ruptura de stock), representado por la variable C_{Rup}.
√ El costo anual de tenencia (almacenamiento o mantenimiento) por unidad es H.

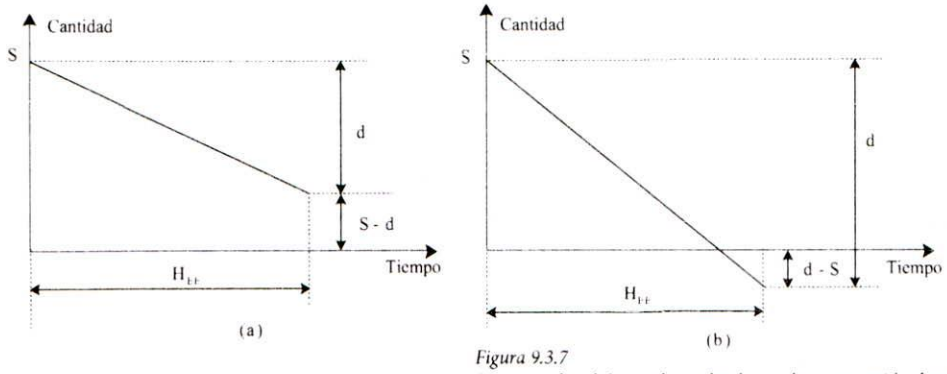


Figura 9.3.7
Situación de subdemanda y sobredemanda transcurrido el período H_{EE}

Para el caso particular en que el costo de almacenamiento del repuesto es despreciable (H≈0), y con demanda aleatoria uniforme, se adopta la ecuación 9.3.13 para representar el costo total (CT) de la gestión de inventario.

$$CT(S) = \sum_{d=0}^{S} (S - d)\, C_{Ex}\, p(d) + \sum_{d=S+1}^{\infty} (d - S)\, C_{Rup}\, p(d) \qquad 9.3.13$$

p(d) es la probabilidad de demandar d unidades en todo H_{EE}. Obsérvese que el primer término valoriza el riesgo por excedente y el segundo tiene en cuenta el riesgo de ruptura de stock. El objetivo es encontrar el menor valor de CT(S) para distintos valores de S (0, 1, 2, ... , n). Con la ayuda de una planilla de cálculo es sencillo resolver la ecuación 9.3.13.

Ejemplo 9.3.2
Se desea evaluar la conveniencia económica de tener cierto repuesto en stock. En condiciones normales su precio asciende a $3.800. Si el repuesto falla detiene la máquina en la que está instalado, interrum-

1 Un repuesto de demanda independiente es aquel cuya demanda no depende de la demanda de ningún otro.

piendo completamente un proceso de fabricación. En tal situación la empresa debe afrontar un gasto de $160.000 en conceptos de producción perdida y plazo de entrega especial (urgencia) para obtener el repuesto. El horizonte de evaluación económica H_{EE} por previsión de inversiones es 6 años, porque el equipo será sustituido al cabo de ese tiempo.

Se desprecia el costo de mantener cada unidad en stock ($H \approx 0$) y se cree posible lograr un valor de $300 por la reventa de cada unidad sobrante luego de H_{EE}. La experiencia del personal y la evidencia histórica indican que el periodo promedio para la falla (MTTF) de este repuesto es 25 años. Resumiendo:

C_{Rup} = $160.000

C_{Ex} = $3.800 - $300 = $3.500

H_{EE} = 6 años

MTTF = 25 años.

En primer lugar calculamos la probabilidad de la demanda p(d) para d=0, 1, 2, ..., n, siendo que debemos simular las distintas posibilidades de demanda. El dato de utilidad es la tasa de fallas que se expresa a través de λ = 1/25 años = 0,04 fallos/año.

La máquina posee una sola unidad de este repuesto, por tanto, si debemos simular distintas demandas, es posible asumir la ley de distribución de Poisson para variable discreta dada por la ecuación 1.2.29 del Capítulo 1.

$$p(x) = \frac{(\lambda t)^x \cdot e^{-\lambda t}}{x!} \longrightarrow p(d) = \frac{(\lambda H_{EE})^d . e^{-\lambda H_{EE}}}{d!}$$

Para un horizonte H_{EE} = 6 años, una tasa de fallas λ = 0,04 y variando la demanda d de 0 a 10, se obtiene la segunda columna de la tabla mostrada en la figura 9.3.8. Luego, y para cada fila, se calcula el costo por exceso y por agotamiento que provocarían las distintas cantidades de unidades en stock (S), utilizando la primera y segunda sumatoria de la ecuación 9.3.13 respectivamente.

Obsérvese que para el caso supuesto de cero unidades en stock (S=0), el costo por exceso es nulo y el costo total CT(0) es únicamente el riesgo de costo por ruptura de stock. Notar que la situación de costo total mínimo se obtiene con 2 unidades almacenadas a un valor de $6.495. Para S=3 el costo total CT comienza a incrementarse nuevamente ($9.680).

La aplicación de la ecuación 9.3.13 para el entorno de valores p(d), y hasta el supuesto de S=3, se muestra en la figura 9.3.8.

d	p(d)	Stock (S)											
		0			1			2			3		
		C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=0)	C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=1)	C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=2)	C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=3)
0	0,7866279	$ 0	$ 30.207	$ 30.207	$ 2.753	$ 3.625	$ 6.378	$ 5.506	$ 290	$ 5.796	$ 8.260	$ 17	$ 8.277
1	0,1887907		$ 7.250	$ 7.250	$ 0	$ 580	$ 580	$ 661	$ 35	$ 696	$ 1.322	$ 2	$ 1.323
2	0,0226549		$ 870	$ 870		$ 52	$ 52	$ 0	$ 3	$ 3	$ 79	$ 0	$ 79
3	0,0018124		$ 70	$ 70		$ 3	$ 3		$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0
4	0,0001087		$ 4	$ 4		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
5	0,0000052		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
6	0,0000002		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
7	0,0000000		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
8	0,0000000		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
9	0,0000000		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
10	0,0000000		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
		$ 0	$ 38.400	**$ 38.400**	$ 2.753	$ 4.260	**$ 7.014**	$ 6.167	$ 327	**$ 6.495**	$ 9.660	$ 19	**$ 9.680**

Menor Costo Total

Figura 9.3.8
Planilla de evaluación para distintos valores de S y demanda probabilística.

Téngase en cuenta que las distintas simulaciones CT(S) con S = 0, 1,..., 3 se obtienen como la suma de los valores respectivos de C_{Ex} y C_{Rup}.

Para los casos en que el costo de tenencia por unidad y por año (H) no puede despreciarse, se procede de la misma forma, sólo que utilizando la siguiente expresión.

$$CT(S) = \sum_{d=0}^{S} (S - d)\, C_{Ex}\, p(d) + \sum_{d=S+1}^{\infty} (d - S)\, C_{Rup}\, p(d) + H \left[\sum_{d=0}^{S} (S - d/2)\, p(d) + \sum_{d=S+1}^{\infty} S^2/2d\ p(d) \right] \qquad 9.3.14$$

En la ecuación 9.3.14, el costo por mantener las distintas cantidades en exceso a lo largo de H_{EE}, se incorpora en el tercer término entre corchetes.

Ejemplo 9.3.3

Supóngase el mismo ejemplo anterior pero ahora el costo unitario de mantención del ítem no es despreciable. Si la tasa de interés anual C_f es 10% y el factor C_a / V_T de la ecuación 9.3.9 es 15%, se tiene:

$$H = V_i \times (0{,}15\% + 0{,}10\%) = \$3.800/\text{año} \times (0{,}15\% + 0{,}10\\%) \times 6 \text{ años} = \$5.700$$

Operando de igual forma en la planilla, pero utilizando la ecuación 9.3.14, se consolida la tabla mostrada en la figura 9.3.9.

d	p(d)	Stock (S)											
		0				1				2			
		C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=0)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=1)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=2)
0	0,7866279	$ 0	$ 30.207	$ 0	$ 30.207	$ 2.753	$ 3.625	$ 4.516	$ 10.894	$ 5.506	$ 290	$ 8.974	$ 14.771
1	0,1887907		$ 7.250	$ 0	$ 7.250	$ 0	$ 580	$ 540	$ 1.120	$ 661	$ 35	$ 1.614	$ 2.310
2	0,0226549		$ 870	$ 0	$ 870		$ 52	$ 0	$ 52	$ 0	$ 3	$ 129	$ 132
3	0,0018124		$ 70	$ 0	$ 70		$ 3	$ 0	$ 3		$ 0	$ 0	$ 0
4	0,0001087		$ 4	$ 0	$ 4		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
5	0,0000052		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
6	0,0000002		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
7	0,0000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
8	0,0000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
9	0,0000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
10	0,0000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
		$ 0	$ 38.400	$ 0	**$ 38.400**	$ 2.753	$ 4.260	$ 5.056	**$ 12.070**	$ 6.167	$ 327	$ 10.718	**$ 17.213**

Menor Costo Total

Figura 9.3.9
Planilla de cálculo para distintos valores de S y demanda probabilística con H ≠ 0.

Habiendo introducido el costo de mantenimiento del ítem (H), el menor costo total se da cuando se almacena únicamente una unidad CT(S=1) con un valor de $12.070 para todo H_{EE}. A partir de S=2 el costo total comienza a aumentar.

En ambos ejemplos, se interrumpe el cálculo de $CT(S_i)$ al verificar que ha sido posible hallar un mínimo para la expresión; de nada sirve continuar calculando valores porque aumentarán indefinidamente.

Ejemplo 9.3.4

Supóngase ahora que en lugar de uno, son dos los equipos independientes que usan el mismo repuesto analizado en los ejemplos anteriores. Aún con los mismos datos, la probabilidad de demanda del repuesto no es la misma.

Por ejemplo, la probabilidad de no demandar ninguna unidad durante todo H_{EE}, cuando son dos los repuestos instalados, es el producto de las dos probabilidades de no demandar ninguna unidad en cada equipo.

$p_2(0) = p(0) \,.\, p(0)$

De igual forma se tiene que:

$p_2(1) = p(0).p(1) + p(1).p(0)$

$p_2(2) = p(0).p(2) + p(1).p(1) + p(2).p(0) = p(1)^2 + 2.p(0).p(2)$

$p_2(3) = p(0).p(3) + p(1).p(2) + p(2).p(1) + p(3).p(0) = 2.p(0).p(3) + 2.p(1).p(2)$

$p_2(4) = p(0).p(4) + p(1).p(3) + p(2).p(2) + p(3).p(1) + p(4).p(0) = p(2)^2 + 2.p(0).p(4) + 2.p(1).p(3)$

Operando hasta $p_2(10)$ se forma la tercera columna $p_2(d)$ de la grilla que ilustra la figura 9.3.10. Téngase en cuenta que en este ejemplo también se considera el costo anual de mantenimiento del ítem ($H \neq 0$).

Obsérvese que la cantidad óptima a almacenar vuelve a ser de 2 unidades.

d	p(d)	$p_2(d)$	Stock (S)															
			0				1				2				3			
			C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=0)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=1)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=2)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=3)
0	0,7866	0,6188	$ 0	$ 47.523	$ 0	$ 47.523	$ 2.166	$ 11.405	$ 3.629	$ 17.200	$ 4.331	$ 1.825	$ 7.097	$ 13.254	$ 6.497	$ 219	$ 10.590	$ 17.306
1	0,1888	0,2970		$ 22.811	$ 0	$ 22.811	$ 0	$ 3.650	$ 857	$ 4.507	$ 1.040	$ 438	$ 2.543	$ 4.021	$ 2.079	$ 42	$ 4.233	$ 6.354
2	0,0227	0,0713		$ 5.475	$ 0	$ 5.475		$ 657	$ 1	$ 658	$ 0	$ 63	$ 407	$ 470	$ 249	$ 5	$ 813	$ 1.067
3	0,0018	0,0114		$ 876	$ 0	$ 876		$ 84	$ 0	$ 84		$ 7	$ 0	$ 7	$ 0	$ 0	$ 98	$ 98
4	0,0001	0,0014		$ 105	$ 0	$ 105		$ 8	$ 0	$ 8		$ 1	$ 0	$ 1		$ 0	$ 0	$ 0
5	0,0000	0,0001		$ 10	$ 0	$ 10		$ 1	$ 0	$ 1		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
6	0,0000	0,0000		$ 1	$ 0	$ 1		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
7	0,0000	0,0000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
8	0,0000	0,0000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
9	0,0000	0,0000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
10	0,0000	0,0000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
			$ 0	$ 76.800	$ 0	**$ 76.800**	$ 2.166	$ 15.805	$ 4.487	**$ 22.458**	$ 5.371	$ 2.333	$ 10.047	**$ 17.752**	$ 8.826	$ 267	$ 15.733	**$ 24.826**

Menor Costo Total

Figura 9.3.10
Planilla de cálculo para distintos valores de S y demanda probabilística de dos equipos con $H \neq 0$.

Si los valores de probabilidad de la demanda p(d) fuesen conocidos, no sería necesario aplicar la ecuación de Poisson para variable discreta; directamente se reemplazarían los valores p(d) en la segunda (o tercera) columna y se resolverían las sumatorias.

Ejemplo 9.3.5

Una línea embotelladora de bebidas posee una llenadora que será reemplazada en 2 años. Dentro de sus repuestos específicos hay una plaqueta electrónica que fue sustituida la semana pasada. Aún queda en stock 1 plaqueta que se desmontó de otra llenadora en desuso y, que en caso de necesidad, puede utilizarse sin problemas.

El Supervisor de Almacén preguntó a Mantenimiento si era necesario comprar una unidad para completar el stock de 2. El costo de cada plaqueta es de $5.250 y en los últimos 12 años se usaron 3, incluyendo la consumida la última semana. Debido al plazo de entrega de este repuesto, si la máquina se detiene en el período de alta temporada y no hay stock suficiente se genera una pérdida económica de $50.000.

Asumiendo que los gastos de almacenamiento son despreciables, evaluar la respuesta que debe dársele al Supervisor de Almacén.

El resumen de los datos es el siguiente:

H_{EE} = 2 años.

C_{Ex} = $5.250

MTTF = 12 años/3 fallos = 4 años/fallo

λ = 0,25 fallos/año

C_{Rup} = $50.000

Calculando la probabilidad de la demanda y aplicando la ecuación 9.3.13 de manera análoga a los ejemplos anteriores, se obtiene la tabla siguiente.

d	p(d)	Stock (S)								
		0			1			2		
		C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=0)	C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=1)	C_{Ex}	C_{Rup}	CT(S=2)
0	0,6065307	$ 0	$ 15.163	$ 15.163	$ 3.184	$ 3.791	$ 6.975	$ 6.369	$ 632	$ 7.000
1	0,3032653		$ 7.582	$ 7.582	$ 0	$ 1.264	$ 1.264	$ 1.592	$ 158	$ 1.750
2	0,0758163		$ 1.895	$ 1.895		$ 237	$ 237	$ 0	$ 24	$ 24
3	0,0126361		$ 316	$ 316		$ 32	$ 32		$ 3	$ 3
4	0,0015795		$ 39	$ 39		$ 3	$ 3		$ 0	$ 0
5	0,0001580		$ 4	$ 4		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
6	0,0000132		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
7	0,0000009		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
8	0,0000001		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
9	0,0000000		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
10	0,0000000		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0		$ 0	$ 0
		$ 0	$ 25.000	**$ 25.000**	$ 3.184	$ 5.327	**$ 8.511**	$ 7.961	$ 816	**$ 8.777**

Menor Costo Total

Figura 9.3.11 Planilla de cálculo para los valores del ejemplo 9.3.5.

Obsérvese que sólo es necesario mantener una plaqueta, por lo que no vale la pena adquirir otra.

Los ejemplos vistos son relativamente fáciles de resolver con ayuda de planillas de cálculo. Sin embargo, en la práctica las situaciones reales suelen ser más complejas. Puede haber mayor cantidad de equipos en la Planta que utilizan el mismo repuesto, e incluso unidades en stand-by que afectan los cálculos de manera significativa.

Existen soluciones informáticas, como la provista por la firma **MA Consultora**[1] llamada EDR 4.0, que agilizan enormemente la evaluación de riesgo económico para repuestos de demanda no previsible (modelo probabilístico). Aconsejamos consultar el mencionado producto porque resuelve situaciones reales de alta complejidad con extrema facilidad para el usuario.

La importancia de incorporar Revisiones de Stocks (Análisis de Reposición)

Los sistemas informáticos de gestión de stocks (SGS) detectan inmediatamente el consumo de cualquier ítem si son de Revisión Continua; y esta propiedad debe aprovecharse.

Un estado superior de optimización para el modelo probabilístico, es aquel que abandona la idea de **único pedido** para todo H_{EE} y puede solicitar unidades del repuesto conforme éste es consumido. El plazo de entrega (PE) y la tasa de actualización del dinero (C_t) son, entonces, las nuevas variables que se incorporan al proceso de toma de decisiones.

De esta forma, en lugar de determinar la cantidad (S) del repuesto a **tener**, se determina el stock máximos (SMA) del repuesto a **mantener**. Esto reduce la cantidad inicial (S) de unidades, siempre que el riesgo de demanda p(d) valorizado para el plazo de entrega lo permita.

---

1 ***MA Consultora*** *es una firma de alcance internacional dedicada a la implementación, el desarrollo, coaching y capacitación en temas de Gestión y Mejora Continua para las áreas de Logística, Operaciones, Almacenaje, Distribución, Proyectos y Mantenimiento.*

Veamos que sucedería si en ejemplo 9.3.4 en lugar de adquirir inicialmente 2 unidades para todo H_{EE} (6 años), y afrontar un costo total esperado de $17.752, se compra sólo una unidad.

Ante la demanda de la unidad (por cualquiera de los dos equipos) el stock volvería a cero. Tal decisión sería válida únicamente si el riesgo valorizado para un horizonte equivalente al plazo de entrega lo permite; vale decir, debería hacerse el mismo análisis pero para H_{EE} = PE. Si el resultado de este nuevo escenario indica que el stock a mantener debe ser 0, entonces la decisión adoptada de iniciar con una sola unidad sería la apropiada. Obviamente, la revisión continua del stock **debe garantizar** que, inmediatamente después de consumir la única unidad en existencia, se dispare rápidamente un pedido de compra por otra unidad.

Suponiendo que el repuesto del ejemplo 9.3.4 puede obtenerse en 8 días, se tiene:
Este ejemplo descuida la tasa de actualización del dinero C_f.

d	p(d)	p_2(d)	Stock (S)											
			0				1				2			
			C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=0)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=1)	C_{Ex}	C_{Rup}	H	CT(S=2)
0	0,999112	0,998224	$ 0	$ 284	$ 0	$ 284	$ 3.494	$ 0	$ 5.690	$ 9.184	$ 6.988	$ 0	$ 11.380	$ 18.367
1	0,000888	0,001775		$ 1	$ 0	$ 1	$ 0	$ 0	$ 5	$ 5	$ 6	$ 0	$ 15	$ 21
2	0,000000	0,000002		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0	$ 0
3	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
4	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
5	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
6	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
7	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
8	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
9	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
10	0,000000	0,000000		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0		$ 0	$ 0	$ 0
			$ 0	$ 284	$ 0	**$ 284**	$ 3.494	$ 0	$ 5.695	**$ 9.189**	$ 6.994	$ 0	$ 11.395	**$ 18.389**

Menor Costo Total

Figura 9.3.12
Planilla de cálculo para los valores del ejemplo 9.3.4, optimizado con H_{EE} = 8 días.

Si la cantidad óptima con H_{EE} = PE = 8 días es 0, entonces para todo H_{EE} = 6 años es suficiente con **mantener** un stock máximo (SMA) de 1 unidad, con la salvedad de disparar de inmediato un nuevo pedido de compra cuando dicha unidad se consume.

Puede notarse lo importante de tener modelos de Revisión Continua porque garantizan que, al menor movimiento de stock, se dispare inmediatamente un nuevo pedido.

No obstante, si no fuese posible implementar algún sistema de Revisión Continua, puede aplicarse una frecuencia de revisión que sea función del MTTF del repuesto o, aún más simple, revisar el stock de tales repuestos quincenal o mensualmente.

Programas como el mencionado más arriba (EDR 4.0 de la firma **MA Consultora**) hacen esta clase de análisis automáticamente, obteniendo soluciones más eficientes y rápidas que las hechas de forma manual.

9.3.3 Modelo de Aprovisionamiento JIT (Just in Time)

El modelo de aprovisionamiento *Just in Time* (JIT) excede ampliamente la gestión de repuestos para Mantenimiento. No obstante, resulta interesante citar algunos fundamentos de la filosofía y tenerlos en cuenta para mejorar la calidad del servicio y el nivel de existencias del Almacén.

El objetivo principal del sistema de fabricación *Justo a Tiempo* (adaptación castellana), es reducir a la mínima expresión el inventario en curso durante todo el proceso de fabricación de los productos. La idea central es que las *cosas* (materias primas, herramientas, repuestos, piezas, etc.) estén en el lugar indicado, en la cantidad justa y en el momento preciso; ni antes ni después. Para reducir el inventario (considerado un vicio del sistema), la metodología busca eliminar completamente las causas que lo generan. Y es aquí donde puede encontrarse una relación favorable para enriquecer la gestión de materiales vista hasta el momento.

El JIT considera que el inventario es una falencia causada por errores de proceso, y que los motivos más importantes que lo crean son la falta de previsibilidad, el incumplimiento de los plazos acordados y los desperdicios de cualquier índole. Además, el inventario ocupa espacio, y el espacio es un recurso costoso.

Como toda disciplina oriunda del Japón, el JIT (como el TPM[1]) es un método de trabajo que se nutre de la capacidad y el compromiso de los trabajadores y directivos.

Mantener cualquier repuesto en stock cuesta dinero, y si el repuesto no es necesario, dicho costo genera un gasto inútil. Veamos, entonces, cómo aprovechar estas ideas para optimizar la gestión de repuestos.

Cuando definimos el stock de seguridad (SS), según las ecuaciones 9.3.2, 9.3.3 y 9.3.4, vimos que las variables que intervienen apuntan a atenuar las fluctuaciones y la incertidumbre. Las fluctuaciones se refieren exclusivamente a las de la demanda (D); mientras que la incertidumbre, a la del plazo de entrega (PE). En el modelo determinista, el stock de seguridad será mayor cuanto más oscilante sea el comportamiento de la demanda y cuanto menos se respeten los compromisos asumidos para el plazo de entrega. También se dijo que, más que pujar por plazos de entrega pequeños, debe procurarse (acordarse) plazos de entrega exactos.

Sencillo es darse cuenta que el área de Mantenimiento puede acompañar un modelo de estas características aportando su capacidad de gestión para dotar a la demanda de repuestos de previsibilidad (reduciendo los fallos imprevistos). Por su parte, el departamento de Compras debe lograr acuerdos con los proveedores para que los plazos de entrega sean poco menos que honrados.

Si el stock de seguridad se reduce, también lo hace el stock promedio (SP) y, en definitiva, el capital inmovilizado desciende. El nivel de rotación de cada uno de los repuestos es un factor de suma importancia en la optimización de existencias.

No obstante lo dicho, y para no caer en facilismos, estos métodos de optimización requieren de un alto compromiso gerencial. Los colaboradores deben comprender cabalmente el objetivo y comprometerse con el proceso de mejora. Para ello, la compañía debe proveer los medios y recursos necesarios, y propiciar ambientes de motivación laboral que vayan más allá de las palabras. Una organización persuadida del daño que significa el inventario, dotará a las personas de los medios y recursos suficientes para reducirlo. Sólo bajo estas circunstancias es posible aplicar una metodología de mejora como la mencionada que involucre a todos los integrantes de la organización.

Es muy saludable y enriquecedor iniciar y terminar estos procesos de optimización. El personal interviniente se siente partícipe y aporta sus conocimientos y experiencias con total libertad. Además, estimula el trabajo en equipo integrando las distintas disciplinas; Almacén, Compras y Mantenimiento.

---

1 Ver sección 7.4 "Mantenimiento Productivo Total (TPM)". Capítulo 7.

9.4 Gestión del Almacén de Repuestos

Quedan aún por describir algunos conceptos administrativos de importancia con relación a la gestión de inventarios. Tales consideraciones pueden facilitar el cumplimiento de los objetivos primarios enunciados en la sección 9.1.

9.4.1 Relación del Almacén con otras áreas

Generalmente el Almacén de Repuestos depende del departamento de Mantenimiento, al igual que el pañol de herramientas. No obstante, e independientemente de ello, la relación funcional del Almacén con otras áreas de la empresa puede explicarse a través del esquema que ilustra la figura 9.4.1.

Figura 9.4.1 Interacción entre Mantenimiento y otras áreas de la organización.

La relación funcional que se ilustra, tiene en cuenta la interacción de cuatro sectores claves en el abastecimiento de material técnico. El pañol de herramientas es abastecido por el Almacén y, a su vez, atiende las necesidades de los operarios del taller. Un pañol se justifica en organizaciones de gran tamaño para reducir los tiempos muertos por traslado y la cantidad en stock de máquinas y herramientas de uso específico. Como desventajas podemos mencionar la necesidad de contar con mayor espacio y mayor personal, y duplicar los controles en la reposición de ítems. El departamento de Compras, por su parte, satisface las necesidades de reabastecimiento según los faltantes detectados por el control de stock que lleva adelante el Almacén y que los canaliza a través de solicitudes de pedido. La figura 9.4.2 es un diagrama general de control de stock y manejo de ítems catalogados.

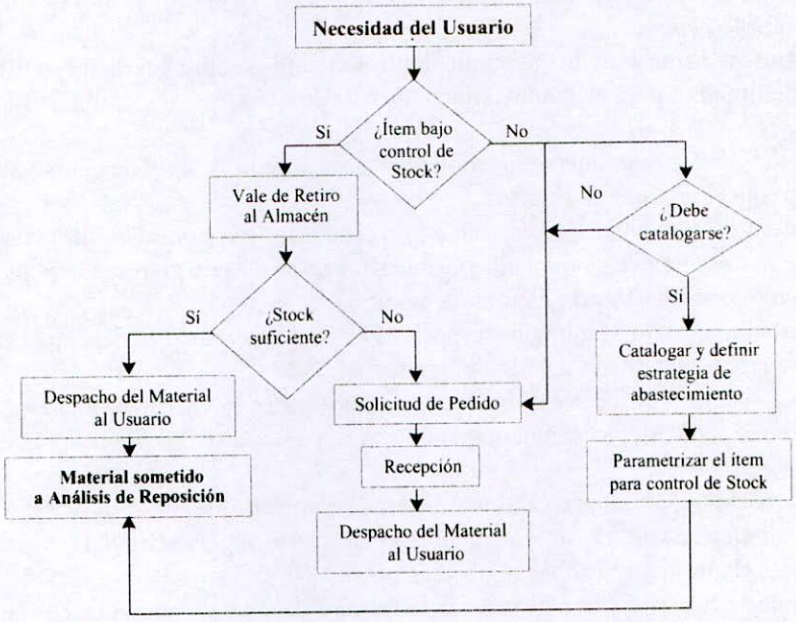


Figura 9.4.2 Modelo de Gestión de Material Técnico.

Descentralización de Almacenes

Si el modelo funcional - impuesto por la ubicación física de los activos - señala que es preciso tener varios almacenes descentralizados, deben considerarse los siguientes factores:

- √ Cantidad de máquinas que utilizan repuestos específicos en las distintas zonas.
- √ Clase de repuestos (específicos, universales, consumibles, etc.).
- √ Cercanía entre máquinas y Almacén Central.
- √ Costo del repuesto, grado de rotación y costo de mantenimiento de los ítems específicos.
- √ Seguridad para el almacenamiento. Tipo de control y mantenimiento de los ítems.

Entre las muy variadas clases de descentralización podemos destacar dos. La primera ocurre en organizaciones con varias Plantas (Unidades Productivas) ubicadas en zonas geográficas muy alejadas. En estos casos no existe físicamente un Almacén Central que distribuye todos los materiales a las distintas zonas; cada Planta conserva la mayor parte de los repuestos que necesita, sobre todo los artículos generales, consumibles y universales. Para los repuestos específicos de baja rotación y alto costo puede optarse por una política de ítem compartido. Esto significa que si, por ejemplo, un mismo tipo de máquina está instalada en tres Plantas y la evaluación económica de riesgo (método probabilístico) para alguno de sus repuestos específicos indica que es necesario mantener en stock una unidad, a lo mejor no sea necesario que todas las Plantas mantengan el mismo repuesto en existencia. Sólo bastará con que en una de ellas esté físicamente localizado y que en caso de necesidad pueda enviarse de un centro productivo al otro[1].

El segundo tipo de descentralización posible es aquella que puede presentarse en la misma Planta. En tal esquema, un Almacén Central distribuye el flujo de material a pequeños centros o sitios de consumo llamados *Almacenes de Línea*. Los almacenes de línea sólo albergan materiales de uso frecuente y herramientas especiales (habitualmente necesarias para realizar tareas de producción como cambios de formato o calibre). Cada almacén de línea deberá tener un responsable que responda por los materiales que ingresan y salen diariamente, aunque su obligación no sea estar permanentemente en el sitio.

9.4.2 Criterios de almacenamiento

No todos los materiales requieren el mismo cuidado para su almacenamiento. Mientras algunos pueden estar de cualquier forma apilados en un cajón, otros precisarán una atención especial. Incluso habrá repuestos (específicos y subconjuntos) que deberán someterse a estrictos planes de mantenimiento o a recambios por obsolescencia.

A continuación se listan muy brevemente algunos ejemplos sobre condiciones mínimas de almacenaje y/o mantenimiento para elementos típicos de un Almacén.

- √ Los rodamientos deben mantenerse en ambientes secos, limpios y libres de vibraciones; incluso algunos pueden requerir rutinas de rotación.
- √ Las piezas mecánicas de precisión deberán estar recubiertas con grasa y envueltas en cartón, poliestireno u otro material que las proteja de posibles impactos. Las de gran porte es recomendable que se guarden en cajones, bastidores o cunas de madera.
- √ Los lubricantes merecen un tratamiento especial. Deben almacenarse en depósitos que cumplan con las normas referidas al cuidado del Medio Ambiente.
- √ Las pinturas, solventes y productos químicos deben localizarse en lugares ventilados que satisfagan las normas de Seguridad y Medio Ambiente establecidas, y estar aislados del resto de los materiales de uso común.
- √ Los electrodos deben guardarse en ambientes secos y templados según indicaciones del fabricante.
- √ Los materiales con fecha de vencimiento deben ser controlados por el sistema informático de gestión de stock (SGS), el que alertará sobre su obsolescencia.
- √ Los motores eléctricos cuya potencia supera cierto valor deben estar sometidos a planes de mantenimiento de preservación como rotar regularmente el eje para evitar daños incipientes en sus rodamientos. Estas tareas las puede realizar directamente el personal de mantenimiento.

---

1 En la evaluación económica deberán considerarse también los gastos de traslado.

Otro factor importante, es la localización o ubicación física de cada material. La búsqueda de eficiencia a través de optimizar espacios y mejorar los tiempos y métodos de trabajo, es una tarea insoslayable. El tiempo y el espacio mal aprovechados son recursos perdidos. El espacio debe aprovecharse pero sin renunciar a las condiciones mínimas de almacenaje señaladas con anterioridad. A su vez, los tiempos de trabajo pueden mejorarse con una distribución inteligente de las existencias. El factor principal es el grado de rotación. Los materiales de mayor movimiento se ubicarán cerca de los sitios de despacho; mientras que los de menor rotación podrán depositarse en lugares menos accesibles.

Poco valor agregaría que se profundice sobre esta materia siendo que hay suficiente y reconocida bibliografía especializada sobre distribución y manejo de materiales. Sólo diremos que una distribución acertada de los materiales del Almacén puede ahorrar hasta un 40% del tiempo necesario para recepción y despacho.

Establecido el lugar que ocupará cada pieza debe identificarse en el frente de la gaveta, cajón, estante o armario, el código de catálogo y la descripción breve. El sistema de gestión (SGS) tiene que reflejar la misma información que la cartelería.

Es recomendable que la distribución de espacios también esté codificada. Se usa un código que refiere, con pares de números o letras, el cuerpo, módulo, estante y gaveta en que está almacenado el artículo. Ver figura 9.4.3.

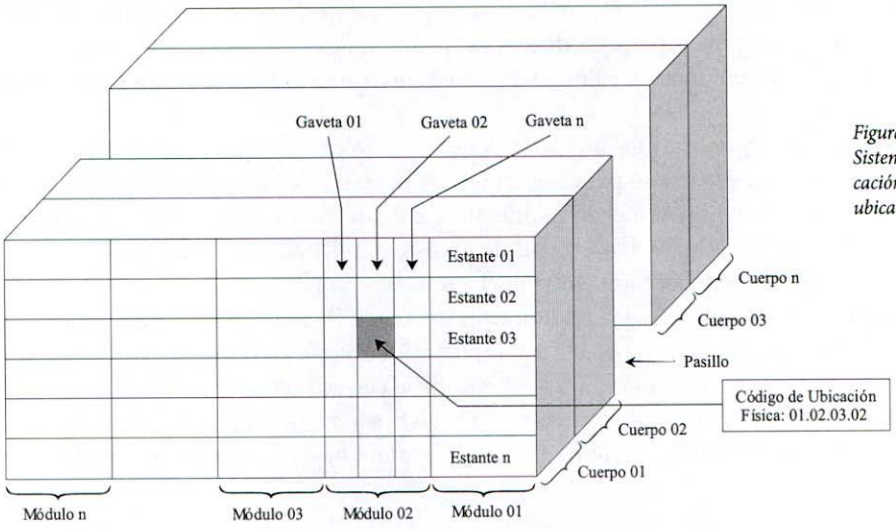


Figura 9.4.3
Sistema de codificación interno para ubicaciones físicas.

Contar con sistemas de codificación espacial, que asignen unívocamente un número para cada posición, facilita la localización de cualquier ítem dentro del depósito. Esta modalidad se conoce como *código interno de ubicación física* y nada tiene que ver con el código de catálogo del ítem analizado en el apartado 9.1.2. El código de catálogo es un dato maestro que nunca cambia para el artículo, mientras que el código interno de ubicación física es un campo de escritura o selección que varia en función del lugar que ocupa el ítem en el Almacén.

9.4.3 Auditorias de Inventario

Aún teniendo una elevada tasa de emisión de Vales de Retiro de Materiales (VRM), es común que haya diferencias entre el stock que acusa el SGS y la existencia física real en depósito. Tales diferencias de inventario no deberían superar el valor definido como tolerable para cada grupo de repuestos. En aquellos grupos de alta rotación y bajo precio unitario se puede ser más permisivo (hasta un 10% de diferencia). En los repuestos específicos pertenecientes al grupo A según método ABC (baja rotación / alto precio unitario), debe tolerarse menor margen de desvío (<1%). Las diferencias de inventario pueden cuantificarse de acuerdo a los siguientes criterios.

√ *Cantidad (o porcentaje) de materiales desviados del total de auditados (muestra).* Si, por ejemplo, de 150 códigos auditados (muestra) se encuentran diferencias en 6, se tiene un 4% de ítems con diferencias.

√ *Desvío porcentual absoluto promedio de los ítems encontrados con desvíos en relación a las unidades que indica el SGS.* Si, por ejemplo, en los 6 ítems desviados se obtuvieron los datos de la figura 9.4.4, entonces la diferencia porcentual promedio es de 6,4%.

Concepto	Códigos					
	04.05.112	12.03.456	02.02.340	01.03.345	04.05.231	21.06.097
Existencia en SGS	10	50	256	8	34	18
Existencia Real	9	45	255	7	34	19
Diferencia	1	5	1	1	0	-1
[%] Diferencia	10,0%	10,0%	0,4%	12,5%	0,0%	-5,6%
[%] Diferencia Absoluta	10,0%	10,0%	0,4%	12,5%	0,0%	5,6%
Diferencia [%] Promedio	**6,4%**					

Figura 9.4.4 Ejemplo de los resultados obtenidos en una auditoría de inventario.

√ *Monto del desvío que representa la diferencia de unidades según lo indicado por el SGS.* Teniendo el precio unitario de los materiales desviados es fácil obtener el monto total de los desvíos. Suponiendo que todos los materiales valen $1, el monto total desviado del ejemplo anterior habría sido de $9.

√ *Porcentaje del monto total desviado con relación al monto total de los ítems auditados.* Con el precio unitario de todos los ítems se obtiene rápidamente el porcentaje de desvío económico respecto al total del monto auditado. Si sumando los productos del precio unitario de cada ítem por su cantidad en stock obtendríamos $900, entonces el valor porcentual económico de los desvíos del ejemplo sería del 1%.

Los anteriores son algunos de los indicadores que pueden usarse para realizar auditorías de inventario. Queda referirnos al criterio usado para seleccionar la muestra de cada auditoría. En tal sentido existen varias posibilidades. Las muestras habitualmente cambian de una auditoría a otra. En función de la frecuencia de las auditorías, y de la cantidad de ítems que pueden verificarse por auditoría, se deberán armar las muestras que conocerá únicamente el auditor.

Sin entrar en detalles estadísticos, las muestras deben diseñarse con un criterio ponderado de representatividad. Debe hacerse hincapié en los repuestos específicos de demanda incierta, dejando las muestras aleatorias y más reducidas para los ítems de la categoría C.

No obstante, hay modelos predefinidos basados en la estadística que, a través de muestras reducidas y ordenadamente distribuidas en el año, dan un panorama bastante real del grado de diferencia de las existencias.

9.4.4 Estandarización y Obsolescencia

Quizá vinculado al modelo JIT, se encuentra la necesidad de estandarizar al máximo tanto los materiales genéricos o de uso común como los repuestos específicos. Vale mencionar el caso de cierta industria química en cuyo Almacén estaban bajo control de stock 36 tipos diferentes de juntas para el sellado de uniones bridadas. Con semejante diversidad de medidas para cada tipo, el número total de ítems gestionados se elevaba a 180. La gran cantidad de ítems bajo control dificultaba y encarecía la gestión de estos artículos. Sin embargo, el mayor problema radicaba en la falta de estandarización. Cuando un operario debía hacer una sustitución, era tan complicada la decisión de cuál junta utilizar que colocaba aquella que mejor le parecía, incrementando el riesgo de falla y poniendo en peligro algunas operaciones. Si acudía a la Supervisión se producían grandes pérdidas de tiempo en consultas hasta seleccionar el esquema más conveniente.

Un proyecto de optimización de inventarios promovido por la gerencia de mantenimiento, logró reducir sólo a 8 el número total de tipos de *juntas*. Se seleccionaron modelos de juntas que, aún sobredimensionadas con respecto a algunas aplicaciones, cubrían gran diversidad de usos. El sobrecosto en este sentido se vio neutralizado por el menor número de tipos de ítems. La estandarización mejoró este aspecto y redujo la cantidad de ítems en existencia. El stock promedio, sólo del grupo *Juntas*, se redujo en un 42%, lo que representaba un monto anual de capital inmovilizado de $127.680. Además de este ahorro *constante y sonante*, se redujeron los ítems administrados y los costos indirectos asociados. Semejante ahorro de inventario inmovilizado justificó ampliamente los recursos invertidos que, además, fueron gastos fijos porque el trabajo se realizó con propio personal de la empresa.

Los nuevos proyectos también deben considerar la estandarización. En secciones anteriores se ha mencionado que en las etapas de diseño debe participar Ingeniería de Mantenimiento. El objetivo es lograr que las nuevas máquinas utilicen la mayor cantidad de artículos estándares y reducir el alta de repuestos nuevos en el Almacén.

La obsolescencia no es un tema menor en la gestión de inventarios. Sobre todo porque en el personal de Mantenimiento suele observarse cierta tendencia (bien intencionada, por supuesto) a guardar todo aquello que podría ser utilizado en alguna oportunidad futura, aunque incierta. Expresiones como, *esto nos puede salvar en tal situación o aquello puede servirnos para tal o cual cosa*, son muy frecuentes. Sin embargo, debemos entender que aquello que no se utilizará más definitivamente (o muy probablemente) aumenta el riesgo de accidentes, ocupa espacio, favorece el desorden y cuesta dinero mantenerlo, etc.

Por favor, no confundir la baja rotación de un repuesto, con la obsolescencia. Podrá suceder que algunos repuestos tengan extremadamente baja rotación porque son repuestos específicos y su existencia en almacén es imprescindible de acuerdo al modelo probabilístico. Para estos ítems, nada más lejos que la obsolescencia.

Las decisiones sobre materiales obsoletos (venta, remate, disposición final, etc.) se aplican exclusivamente a repuestos que han quedado en desuso porque el equipo al que pertenecen no funcionará más, porque están vencidos, porque perdieron algunas de sus propiedades o por cualquier otra causa que los vuelva innecesarios. Eliminar los obsoletos es una labor que deben desarrollar en conjunto el Almacén y el área de Compras y/o Finanzas. El capital inmovilizado puede reducirse trabajando los materiales obsoletos con criterio técnico – económico.

9.4.5 Indicadores de Gestión de Inventario

Sólo dejaremos planteado en esta sección cuáles son los indicadores más utilizados para llevar adelante la gestión de inventarios. El tema se desarrolla con más profundidad en el Capítulo 12 "Medición y Control del Mantenimiento".

Los principales indicadores, de resultados y de desempeño, son:

- √ *Stock contable*. Representa el monto total de los repuestos almacenados a valor de reposición o a valor de última compra.
- √ *Índice relativo del stock contable en relación a los activos de Planta, a valor de reposición*. Es un indicador porcentual que permite, con ciertos cuidados, comparar la situación entre sitios operativos similares.
- √ *Índice de rotación*. Este indicador de efectividad reconoce el grado de movimiento de un conjunto de ítems. Lo habitual es aplicarlo de manera discriminada para algún grupo o subgrupo, y no al total de existencias. El objetivo es minimizar el valor del inventario por el tiempo de inmovilización.
- √ *Ingreso por compras*. Es el monto total por compras de materiales para un determinado período. Puede aplicarse a determinados grupos de materiales o al total del stock.
- √ *Vales de Retiro de Materiales (VRM) emitidos por período, sector o especialidad*. Se trata de un indicador de desempeño para evaluar la gestión administrativa.
- √ *Vales no despachados al momento de la emisión por faltante de stock*. En ocasiones este indicador es mal interpretado porque se evalúa con respecto al total de los VRM emitidos. En realidad el universo de control son sólo aquellos ítems que **deberían** estar en stock, porque la estrategia de algunos artículos bien puede ser no mantener stock en fábrica y salir a comprar sólo en caso de necesidad.
- √ *Detenciones de máquinas por faltante de repuestos*. Cuando el sistema de información puede registrar e individualizar las situaciones de indisponibilidad causadas por quiebre de stock, es interesante llevar este indicador porque refleja las falencias de la gestión de materiales.
- √ *Índice de plazo de entrega*. Este indicador es aplicable individualmente para cada gestión de compra y/o para cada proveedor. De poco valor sería contar con el plazo de entrega medio de un grupo de proveedores.
- √ *Costo de la gestión de compra (K)*. Este indicador de eficiencia es de gran utilidad para, convenido un objetivo, evaluar los progresos internos del Almacén en lo que se refiere a la gestión administrativa de abastecimiento.

Deben sumarse a éstos, los mencionados en el apartado 9.4.3 "Auditorías de Inventario".

Resumen de aplicación

9.1 Introducción

- *Toda Gestión de Materiales debe satisfacer dos objetivos: asegurar la máxima disponibilidad de los repuestos en todo momento, lo cual tendería a incrementar la reserva total promedio (tener mucho para que nunca falte), y reducir a la mínima cantidad las reservas inmovilizadas que significan capital ocioso (tener poco para que nunca sobre).*
  Para encontrar un equilibrio entre ambos objetivos se usan modelos de análisis y decisión.

- *Mantenimiento, con políticas y estrategias acertadas, puede reducir el consumo de repuestos (demanda) y el stock inmovilizado sin perjudicar la disponibilidad de los equipos de Planta.*

- *Una política global de inventarios deberá contemplar la descentralización física de áreas y la administración conjunta y corporativa de repuestos.*

9.1.1 Objetivos del Almacén de Repuestos

- *El Almacén de Repuestos debe suministrar los ítems (repuestos y materiales) de manera rápida, reducir al mínimo el nivel de existencias (stock), evitar el deterioro de los ítems almacenados e impedir la compra y almacenamiento de repuestos obsoletos.*

9.1.2 Clasificación del Inventario

- ***Artículos Generales**. Incluyen tornillos, alambres, pinturas, gomas, candados, bolsas, remaches, adhesivos, etc. Son ítems de consumo masivo y de fácil obtención en el mercado.*
  ***Herramientas**. Incluyen llaves, mechas, machos, calibres, pinzas, limas, destornilladores, etc.*
  ***Suministros / Consumibles**. Lubricantes, combustibles, filtros, electrodos, chapas, perfiles, discos de corte, polvos absorbentes, trapos, etc.*
  ***Repuestos Universales**. Repuestos genéricos montados en varios equipos. Incluyen rodamientos, empaquetaduras, sellos, juntas, válvulas, retenes, contactores, disyuntores, lámparas, etc.*
  ***Repuestos Específicos**. Repuestos de un diseño específico que, en principio, no pueden sustituirse con repuestos universales. Son repuestos específicos las partes estructurales, los engranajes, cojinetes, piezas de precisión, mecanismos, etc.*
  ***Conjuntos**. Agrupación de elementos ensamblados (subsistemas) fáciles de intercambiar.*

- *La catalogación de material técnico comienza asignando un código numérico a cada ítem. La codificación numérica permite administrar gran cantidad y variedad de ítems (ver figura 9.1.1).*

- *Por lo general se adoptan tres grupos de números (tabla 9.1.2). El primer grupo - de dos dígitos - identifica la clase de repuesto. Luego, el Número de Subgrupo - también de dos dígitos - agrupa los elementos que tienen alguna característica particular dentro del grupo. Por último, el código de repuesto se completa con tres dígitos que identifican unívocamente el material (ver figura 9.1.4).*

9.2 Sistemas de Gestión de Stock (SGS)

- *Los sistemas de gestión de stock (SGS) corren en red y son capaces de controlar el acceso simultáneo de muchas terminales, característica que los hace particularmente útiles.*

- *Con un SGS es posible llevar un registro de existencias, administrar el material que sale de fábrica, gestionar el flujo de vales, efectuar análisis de reposición de los ítems y conocer la ubicación física de cada repuesto.*

9.2.1 Módulos de un SGS

- *Los módulos más importantes de un SGS son:*

  ***Cálculo de Reposición** (Revisión de Existencias). Este módulo coteja, para cada ítem, el punto de pedido y el stock al momento del análisis. Si el stock del ítem es igual o menor al punto de pedido, alerta sobre la necesidad de comprar unidades en la cantidad indicada por el lote de compra.*

  ***Materiales Fuera de Fábrica**. Controla los repuestos enviados fuera de fábrica.*

  ***Pedido de Materiales**. Emite solicitudes de compra una vez efectuados los cálculos de reposición.*

  ***Recepción de Materiales**. Este módulo permite recepcionar los remitos, cotejarlos con la Órden de Compra e ingresar la cantidad recibida de cada ítem en el sistema.*

  ***Despacho de Materiales**. Administra los Vales de Retiro de Materiales permitiendo conocer el gasto por equipo y por centro de costo en todo momento.*

  ***Devolución de Materiales**. Este módulo administra las Devoluciones de Material.*

  ***Pañol de Herramientas**. Permite administrar uno o más Pañoles de Herramientas. Un Pañol es un recinto cercano a las áreas de trabajo para albergar herramientas de uso común.*

9.2.2 Parámetros de Control de Stock

- *Los parámetros de control de stock son datos que se asocian a cada ítem para que el sistema pueda realizar las operaciones de gestión automáticamente. Los parámetros de control de stock más importantes son: ubicación física del ítem dentro del Almacén, grado de rotación (alta, media o baja), estrategia de mantenimiento (si se requiere para su conservación en el depósito), modelo de reposición, cantidad instalada (para repuestos específicos de baja rotación), stock mínimo (SM), stock máximo (SMA), stock de seguridad (SS), punto de pedido (PP), lote de compra (L_C), etc.*

9.3 Nivel Óptimo de Existencias

- *La Gestión de Repuestos tiene dos objetivos: suministrar los ítems rápidamente (disponibilidad inmediata) ante una falla y reducir al mínimo el nivel de existencias (stock). El primer objetivo pretende mantener el proceso productivo en marcha; el segundo, intenta reducir el stock inmovilizado (capital ocioso) hasta los límites permitidos por el costo de adquirir dichos bienes.*

- *Para encontrar un equilibrio entre ambos objetivos debe determinarse el modelo de control de inventario aplicable a cada ítem. En tal sentido existen dos: el modelo **determinista** y el modelo **probabilístico**. Los repuestos que responden al modelo determinista, se los llama de Demanda Conocida; los que se ajustan al modelo probabilístico, se conocen como de Demanda Incierta.*

9.3.1 Modelo Determinista o del Punto de Pedido

- *Un repuesto se dice de Demanda Conocida si puede establecerse, con bastante exactitud, el patrón de consumo que tendrá durante algún tiempo (ver figura 9.3.1). El cuadro siguiente es un resumen de las ecuaciones aplicadas al modelo determinista.*

Indicador	Fórmula	Descripción / Aplicación
Stock de Seguridad (SS)	$SS = D_{Máxima\ (tTA)} - D_{Promedio(tTA)}$	*Protege a la empresa de fluctuaciones adversas en la demanda (D) y de retrasos en la cadena de suministros. Ecuación válida para los casos en que el tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}) no tiene variaciones significativas.*
Stock de Seguridad (SS)	$SS = D_{Máxima\ (tTA)} - D_{Promedio\ (tTA)} + [(t_{TA\ Máximo} - t_{TA\ Promedio}) \cdot D_{Promedio}]$	*Para casos en que el tiempo total de aprovisionamiento (t_{TA}) del ítem tiene variaciones significativas. $D_{Promedio}$: Demanda media.*
Stock Promedio (SP)	$SP = SS + L_C / 2$	*L_C: Lote de Compra. $D_{Promedio}$: Demanda media.*
Punto de Pedido (PP)	$PP = SS + (t_{TA} \cdot D_{Promedio})$	*Válida cuando $t_{TA} < t_{EP}$. $D_{Promedio}$: Demanda media.*
Punto de Pedido (PP)	$PP = SS + (t_{TA} \cdot D_{Promedio}) - (N \cdot L_{C\ (Óptimo)})$	*$D_{Promedio}$: Demanda media. N: Entero mayor sin exceder la relación t_{TA} / t_{EP}*
Intervalo entre Pedidos (t_{EP})	$t_{EP} = (L_C / D_{Promedio}) = T$	*$D_{Promedio}$: Demanda media. L_C: Lote de Compra.*
Lote Óptimo de Compra ($L_{C(Óptimo)}$)	$L_{C\ Optimo} = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot D_{Anual}}{H}}$	*K: Costo de la gestión de reponer el ítem. D_{Anual}: Demanda anual. H: Costo de Almacenaje por unidad por año.*
Costo de la Gestión de Reposición (K)	$K = \frac{C_{tr} + C_{ad} + [(HH_e + HH_r) \cdot C_{HH}]}{C_I}$	*C_{tr}: Costo fijo promedio de transporte. C_{ad}: Gastos fijos administrativos. HH_e: Horas-hombre para emitir un pedido. HH_r: Horas-hombre para recibir un pedido. C_I: Cantidad promedio de filas de un pedido.*
Costo de Almacenaje unitario (H)	$H = V_i \cdot (C_a / V_T + C_f) = V_i \cdot f_H$	*V_i: Valor unitario del ítem. C_a: Costo anual de mantenimiento del ítem. V_T: Valor total del inventario. C_f: Tasa de interés anual.*

- *Calculando y valorizando el stock promedio (SP) de todos los ítems, puede estimarse el capital inmovilizado promedio del total de existencias presentes en el Almacén de Repuestos.*

- *Plantear un stock de seguridad es parte de las adaptaciones propuestas al modelo determinista y es una forma de compensar las fluctuaciones adversas de la demanda y los retrasos en la cadena de suministros; es decir, amortiguar sus aleatoriedades.*

- *Para aplicar de forma masiva las ecuaciones del cuadro anterior son útiles las planillas de cálculo.*

- *Para trabajar con gran cantidad de ítems ver las figuras 9.3.5 y 9.3.6. Además, tener en cuenta los siguientes pasos: aplicar el método ABC o Demanda Valorizada, determinar qué repuestos del grupo A son de Demanda Conocida, agrupar los repuestos que tienen similares valores K, consolidar la información necesaria para completar la planilla de la figura 9.3.5, proceder de igual manera y completar los datos de la planilla indicada en la figura 9.3.6, cargar los resultados (parámetros de stock) en el SGS, revisar periódicamente (al menos una vez al año) los parámetros calculados y repetir los pasos anteriores para los repuestos del grupo B y C.*

9.3.2 Modelo Probabilístico

- *Para repuestos cuya demanda es aleatoria o incierta, y que pueden describirse por una función de densidad de probabilidades, es necesario aplicar modelos probabilísticos. Deben someterse a este modelo los ítems de muy baja rotación, alto precio e, incluso, con extensos plazos de entrega.*

- *El método probabilístico de único artículo define la cantidad (S) a tener de un ítem, o el stock máximo (SMA) a mantener, que satisface su demanda (incierta) para todo un intervalo de tiempo llamado horizonte de evaluación económica (H_{EE}) al mínimo costo global. Ver figura 9.3.7.*

- *El objetivo del modelo probabilístico de simulación es encontrar una solución que brinde el menor costo global (más probable) entre diferentes alternativas; desde no tener el repuesto hasta tenerlo y en distintas cantidades.*

- *El modelo evalúa un sólo repuesto por vez, la demanda del repuesto (d) es independiente y puede ser representada a través de una función de distribución de probabilidades p(d), el horizonte de evaluación económica es único y vale H_{EE}, el repuesto tiene un valor monetario de adquisición V_i, el costo unitario por excedente para H_{EE} es C_{Ex}, se ordena (compra) el repuesto por única vez al inicio del período H_{EE}, la cantidad óptima a tener del ítem para todo H_{EE} es S (incógnita del problema), hay un impacto económico desfavorable (penalización) por unidad faltante (ruptura de stock) llamado C_{Rup} y el costo anual de tenencia por unidad es H. En la tabla siguiente se resumen las ecuaciones que rigen el modelo.*

Indicador	Fórmula	Descripción / Aplicación
Costo Total de la Gestión de Inventario (CT(S))	$CT(S) = \sum_{d=0}^{S} (S - d)\, C_{Ex}\, p(d) + \sum_{d=S+1}^{\infty} (d - S)\, C_{Rup}\, p(d)$	*Para el caso particular en que el costo de almacenaje es despreciable (H≈0).* *p(d): probabilidad de demandar d unidades en todo H_{EE}.* *S: Número de unidades a almacenar.*
Costo Total de la Gestión de Inventario (CT(S))	$CT(S) = \sum_{d=0}^{S} (S - d)\, C_{Ex}\, p(d) + \sum_{d=S+1}^{\infty} (d - S)\, C_{Rup}\, p(d) + H \left[\sum_{d=0}^{S} (S - d/2)\, p(d) + \sum_{d=S+1}^{\infty} S^2 / 2d\ p(d) \right]$	*Cuando el costo de almacenaje no es despreciable (H≠0).* *p(d): probabilidad de demandar d unidades en todo H_{EE}.* *S: Número de unidades a almacenar.*

9.3.3 Modelo de Aprovisionamiento JIT (Just in Time)

- *El objetivo del sistema Justo a Tiempo es reducir a la mínima expresión el inventario en curso durante todo el proceso de fabricación de los productos. La idea es que las materias primas, herramientas, repuestos, piezas, etc., estén en el lugar indicado, en la cantidad justa y en el momento preciso ni antes ni después. Para reducir el inventario (considerado un vicio del sistema), la metodología elimina completamente las causas que lo generan.*

- *El JIT considera que el inventario es una falencia causada por errores de proceso y planificación, y que los motivos más importantes que lo originan son la falta de previsibilidad, el incumplimiento de los plazos acordados y los desperdicios de cualquier índole. Además, el inventario ocupa espacio y el espacio es un recurso costoso.*

- *En el modelo determinista el stock de seguridad será mayor cuanto más oscilante es el comportamiento de la demanda y cuanto menos se respeten los compromisos asumidos para el plazo de entrega. El área de Mantenimiento puede acompañar un modelo JIT aportando su capacidad de gestión para dotar a la demanda de repuestos de previsibilidad (reduciendo los fallos imprevistos). Por su parte, Compras debe lograr acuerdos con los proveedores para que los plazos de entrega sean poco menos que "honrados".*

- *Si el stock de seguridad se reduce, también lo hace el stock promedio (SP) y, en definitiva, el capital inmovilizado desciende. El nivel de rotación de cada uno de los repuestos es un factor de suma importancia en la optimización de existencias.*

- *De todas maneras, estos métodos de optimización requieren de un alto compromiso gerencial. Los colaboradores deben comprender cabalmente el objetivo y comprometerse con el proceso de mejora.*

9.4 Gestión del Almacén de Repuestos

9.4.1 Relación del Almacén con otras áreas

- *La relación funcional del Almacén con otras áreas de la organización puede explicarse a través del esquema que ilustra la figura 9.4.1. A su vez, la figura 9.4.2 muestra un diagrama general de control de stock y manejo de ítems catalogados.*

- *Pueden haber dos tipos de descentralización en un Almacén de Repuestos. La primera ocurre en organizaciones con varias Plantas (Unidades Productivas) ubicadas en zonas geográficas muy alejadas. Cada Planta conserva la mayor parte de los repuestos, sobre todo artículos generales, consumibles y universales. Para los repuestos específicos de baja rotación y alto costo, puede optarse por una política de ítem compartido.*
  La segunda posibilidad de descentralización es aquella que se presenta en la misma Planta. Un Almacén Central distribuye el flujo de material a pequeños centros o sitios de consumo llamados Almacenes de Línea. Estos almacenes albergan sólo materiales de uso frecuente y herramientas especiales.

9.4.2 Criterios de almacenamiento

- *No todos los materiales requieren el mismo cuidado para su almacenamiento. Los rodamientos, por ejemplo, se guardan en ambientes secos, limpios y sin vibraciones. Las piezas mecánicas de precisión deben estar recubiertas con grasa y envueltas en cartón o poliestireno. Los lubricantes deben estar en ambientes ventilados que cumplan con las normas de seguridad al igual que pinturas, solventes y productos químicos.*

- *El espacio debe aprovecharse sin renunciar a las condiciones mínimas de almacenaje señaladas con anterioridad. El factor principal para el almacenaje es el grado de rotación. Los materiales de mayor movimiento se ubicarán cerca de los sitios de despacho, mientras que los de menor rotación podrán depositarse en lugares menos accesibles. Además, la distribución de espacios debe estar codificada (ver figura 9.4.3).*

9.4.3 Auditorias de Inventario

- *Las diferencias de inventario no deberían superar el valor definido como tolerable para cada grupo de repuestos. En los grupos de alta rotación y bajo precio unitario puede permitirse hasta un 10% de diferencia; en repuestos específicos (grupo A) el margen de desvío debería ser menor al 1%.*

- *Algunos indicadores usados para evaluar las diferencias de inventario son: cantidad de materiales desviados del total de auditados, desvío porcentual absoluto promedio de los ítems encontrados con desvíos en relación al SGS, y monto del desvío que representa la diferencia de unidades según lo indicado por el SGS. Ver ejemplo de la figura 9.4.4.*

9.4.4 Estandarización y Obsolescencia

- *Deben estandarizarse al máximo tanto los materiales genéricos (uso común) como los repuestos específicos. Proyectos e Ingeniería de Mantenimiento deben procurar que las nuevas máquinas usen la mayor cantidad de artículos estándar y reducir los repuestos nuevos en el Almacén.*

- *Por lo general existe cierta tendencia (bien intencionada, por supuesto) a guardar todo aquello que podría ser utilizado en alguna oportunidad futura, aunque incierta. Sin embargo, debe entenderse que aquello que no se utilizará más definitivamente (o muy probablemente) aumenta el riesgo de accidentes, ocupa espacio, favorece el desorden y cuesta dinero mantenerlo, etc.*
  Sin embargo, no debe confundirse la baja rotación de un repuesto con la obsolescencia. Puede ocurrir que algunos repuestos tengan baja rotación porque son específicos y que su existencia en almacén sea imprescindible de acuerdo al modelo probabilístico.

9.4.5 Indicadores de Gestión de Inventario

- *Los indicadores más utilizados para llevar adelante la gestión de inventarios son (ver Capítulo 12 "Medición y Control del Mantenimiento"): Stock contable, Índice relativo del stock contable, Índice de rotación, Detenciones de máquinas por faltante de repuestos, Índice de plazo de entrega, Costo de la gestión de compra (K), etc.*

Capítulo 10

Organización del Mantenimiento

Si a las personas se las trata como máquinas, el trabajo pierde todo interés y deja de ser fuente de satisfacciones. En tales condiciones, no es posible esperar productos de buena calidad y confiabilidad[1].

---

1 Kauro Ishikawa (1915 - 1989).

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Valorar la importancia de los talentos humanos para cumplir con los objetivos de Mantenimiento.
- √ Saber cuáles son los factores más importantes que influyen en las estructuras de Mantenimiento.
- √ Conocer algunos esquemas organizativos utilizados en Mantenimiento.
- √ Entender las funciones y responsabilidades de las principales posiciones ocupadas por personal de Mantenimiento.
- √ Valorar la importancia del liderazgo en los puestos de decisión.
- √ Entender la necesidad de capacitar, desarrollar y evaluar los talentos humanos.
- √ Analizar la posibilidad de tercerizar tareas de Mantenimiento.
- √ Participar en la confección de contratos para servicios de Mantenimiento.

Índice de Contenidos

10.1 Introducción

10.2 Factores Estructurales
- Dotación
- Competencias
- Motivación
- Desempeño
- Estructura Orgánica

10.3 Funciones y Responsabilidades
- Posiciones de Mantenimiento
- Comentarios sobre Liderazgo
- Comentarios sobre Span of Control

10.4 Crecimiento de Talentos
- Capacitación
- Desarrollo
- Evaluación

10.5 Tercerización del Mantenimiento
- Razones de la Tercerización
- Contratos para Servicios de Mantenimiento
- Criterios de éxito para la Tercerización de Servicios
- Causas de incumplimiento de contratos

Resumen de aplicación

10.1 Introducción

En los últimos 50 años de historia del mantenimiento se produjeron cambios que, a la vista de cualquier persona, son poco menos que impresionantes. Lamentablemente suele adjudicarse tal evolución casi exclusivamente al avance tecnológico.

Si bien es innegable que la tecnología ha mejorado las herramientas de diagnóstico y la mantenibilidad, por mencionar algo, lo cierto es que también hubo una evolución trascendental en cuanto a la filosofía de gestionar fallas. Los logros alcanzados en materia de confiabilidad, productividad, calidad y seguridad, tienen mucho que ver con el cambio cultural de las sociedades y la importancia que éstas dan al comportamiento humano. Hay nuevos métodos de producción y de gestión de activos, pero también hay una nueva concepción del rol de las personas, su bienestar y su calidad de vida. Tradicionalmente, en los ámbitos tecnológicos, las personas valían por lo que sabían; hoy, no es tan importante lo que saben sino lo que son capaces de hacer. El compromiso, la dedicación y la voluntad se valoran más que el conocimiento. Los métodos de aprendizaje y transmisión de la información han evolucionado; la figura de jefe y subordinado, también.

Sería injusto y equivocado, entonces, creer que solamente el avance tecnológico es capaz de mejorar el desempeño de una máquina. De hecho, muchas herramientas de gestión como TPM, RCM, RCA, etc. requieren dedicación y compromiso de la gente. Y más, mucho de los fracasos, por no decir todos, en la aplicación de estas nuevas técnicas de mejora se produjeron por falta de liderazgo, dedicación, compromiso, solidaridad y voluntad.

El *factor humano* en la gestión de activos tiene, pues, la máxima importancia.

10.2 Factores Estructurales

Un punto importante para obtener el mayor provecho de cualquier organización, es encontrar la manera más eficiente de desplegar los talentos disponibles; es decir, la estructura funcional u organigrama más adecuado para nuestro sistema de gestión de activos. La experiencia demuestra que las estructuras se adaptan y amoldan a las capacidades y voluntades de las personas. Y también las personas, con el tiempo, van formando su perfil de acuerdo al lugar que les ha tocado en el organigrama. Esto quiere decir que los organigramas **reales**, aunque muchos lo nieguen, se construyen un poco en función de lo que la empresa desea, y otro poco en función de lo que son capaces de ofrecer sus integrantes. De acuerdo a la flexibilidad de la empresa y al liderazgo de su personal, ocurrirá más una cosa que la otra.

Desde este punto de vista no hay organigrama patrón de máxima eficiencia; sino que hay que escoger aquel *particular* que permita desarrollar la política deseada y alcanzar los objetivos propuestos por la empresa.

Si nos remitimos al Capítulo 1, el Mantenimiento es un proceso complejo que, a su vez, está inmerso en el proceso global de la empresa de la cual forma parte y a la cual presta servicios. Un tratamiento integral del Mantenimiento debe adaptar su proceso interno al proceso externo (Compañía).

Mantenimiento ya no es sólo una empresa dentro de la Empresa, cuya única obligación es satisfacer al cliente interno llamado Producción; es un sector que aporta beneficios globales velando por la misión y meta de la organización. Al departamento de Mantenimiento, y a sus integrantes, ahora debe interesarles – y estar informados – de la producción, la calidad de los productos terminados, la seguridad de las personas, el impacto ambiental de cada tarea, el nivel de venta, el stock de material en proceso, el nivel de repuestos inmovilizados, el capital de trabajo, etc. Vale decir, todo un conjunto de factores que requieren igual compromiso.

La estructura funcional de Mantenimiento (organigrama) debe satisfacer todas y cada una de estas necesidades, lo que obliga a enfocar el problema desde dos puntos de vista: uno, la interacción del sector con el resto de la organización; el otro, encontrar la máxima eficiencia interna.

El esquema de la figura 10.2.1 muestra el vínculo entre los diferentes sectores de la empresa y los factores de producción actuantes para satisfacer los objetivos planeados.

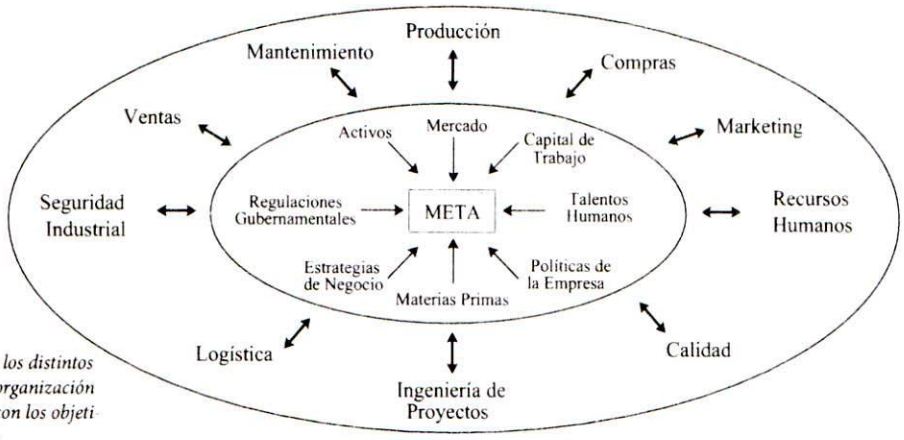


Figura 10.2.1
Interacción de los distintos sectores de la organización para cumplir con los objetivos propuestos.

Cualquiera sea la situación de la compañía siempre deben plantearse, e intentar responderse, los siguientes interrogantes:

- √ ¿La cantidad de colaboradores en Mantenimiento es adecuada?
- √ ¿La capacitación y formación de los colaboradores es suficiente para las funciones que desempeñan y las responsabilidades que asumen?
- √ ¿Está el personal suficientemente motivado para desempeñarse adecuadamente?
- √ ¿El aporte de cada colaborador, es el esperado?
- √ ¿El organigrama responde a las necesidades del departamento y de la empresa?

10.2.1 Dotación

El número de personas afectadas al mantenimiento es una cuestión de equilibrio; sin embargo, nunca falta oportunidad para cuestionar la dotación existente. Mantenimiento es uno de los sectores que primero se mira al momento de optimizar recursos. Veamos cuáles son los dos rubros que debe cubrir el personal del área.

Por un lado están las tareas administrativas y de gestión, mal llamadas tareas indirectas. Por otro, las tareas propias del personal ejecutante al pie de máquina (tareas manuales o de apoyo técnico con presencia física) que se consideran, equivocadamente, *más productivas* que las primeras por el mero hecho de que es más fácil medir su productividad. En rigor, es una trampa hablar de productividad o eficiencia si se trata de talentos humanos. Las personas no son máquinas a las que se les puede medir el *rendimiento operativo*. Y si se consideran como tales, estamos ante un serio problema de gestión.

Un Gerente, Jefe o Analista aparenta, a la vista de cualquiera, ser menos productivo que un Soldador o un Instrumentista, siendo que estos últimos pueden estar casi toda su jornada de trabajo frente a una máquina. Sin embrago, una sola decisión del Jefe de Mantenimiento puede ocasionarle a la Empresa un gasto (o un ahorro) igual a la paga anual de cualquier Soldador calificado, y mucho más.

Si bien formar a los operarios en materia de gestión hace que sea necesaria menor cantidad de mandos medios, pudiendo aumentar el Span of Control[1] de los puestos superiores; también es cierto que alcanzar una condición de autogestión plena lleva varios años y, en algunos casos, violentos cambios en el sistema de gestión y de remuneración. El personal autosuficiente es un objetivo de las estructuras llamadas TBE – Trabajo Basado en Equipos (ver apartado 10.2.5.4).

Diseñar y planificar estrategias de Mantenimiento eficaces es vital para el éxito del negocio, por lo que quitarle mérito al trabajo vinculado con tales actividades es desconocer por completo la especialidad. *Si en Mantenimiento no hay quienes piensen, tendemos al Correctivo perpetuo.* Podrá argumentarse que el Correctivo no es malo (lo cual es cierto porque hasta incluso puede ser más conveniente), pero en la medida que sea evaluado con sensatez. Y justamente para arribar a tal conclusión se precisa personal que tenga tiempo para pensar.

La dotación total del departamento de Mantenimiento, y su distribución en la jornada de trabajo, deberán responder a la carga de mantenimiento pro-activo y reactivo simultáneamente. Conforme se maximice el primero, podrá haber mayor cantidad de horas hombre en *horario central*. El horario central es aquel que va, por ejemplo, desde las 07 a las 16 ó bien desde las 08 a las 17 horas y los sábados medio día (cada convenio laboral hará los debidos ajustes). Dicho horario debe ser cubierto por personal administrativo (gestión, planificación, almacén, etc.), Supervisores, Jefes y Técnicos de las distintas especialidades. Dependiendo del rubro empresarial, puede quedar bajo este régimen horario entre el 70 y el 95% de la dotación total. En horario central deben realizarse las tareas de gestión, las tareas pro-activas (predictivos, preventivos, detectivos, modificativos, lubricación, etc.) y las acciones reactivas que surgieran.

Por otra parte, y si las condiciones productivas lo requieren, habrá que disponer un esquema de turnos fuera del horario central. Sabemos que es imposible eliminar completamente el Mantenimiento Correctivo, pero también sabemos que es posible evaluar sus consecuencias. Si las consecuencias provocadas por las fallas imprevistas justifican disponer cierta dotación para atender los reclamos y las emergencias que surgieran fuera del horario central, debe evaluarse el mejor esquema. Las dos alternativas posibles son: una *guardia Pasiva* o una *guardia en Planta*.

El régimen de guardia en Planta consiste sencillamente en destinar una parte de la dotación permanente a realizar rotación horaria y cubrir toda la jornada (24 horas). El porcentaje de la dotación afectada no debería superar el 30%. Este personal puede ser beneficiado con alguna compensación económica o con descansos compensatorios.

La guardia pasiva es una opción cuando la cantidad de acciones reactivas fuera del horario central no es alta; por ejemplo, si la Planta tiene un alto nivel de redundancias. En estos casos parte del personal con experiencia cumple normalmente el horario central pero, además y fuera de ese horario, rota semanalmente de manera pasiva (en su casa o inmediaciones). Si surge una emergencia se lo llama para que acuda a Planta y resuelva el inconveniente. Luego, es recompensado con horas o días de descanso, o con algún incentivo económico. Las horas semanales trabajadas no deben sobrepasar las permitidas por el convenio laboral vigente.

---

1 Span of Control (Espectro de Control) es el número de personas que reportan directamente a un puesto superior como Jefe, Gerente o Supervisor.

En algunas industrias de proceso muy automatizadas, incluso, se usa una combinación de ambos esquemas. El área eléctrica y de instrumentación mantienen una guardia permanente en Planta para resolver los problemas frecuentes como reponer térmicos, desconectar motores, conectar elementos de medición, etc.; mientras que los especialistas mecánicos se manejan con una guardia pasiva. Además, y de no surgir problemas, podría pedírsele al personal de guardia en Planta que efectúe tareas de mantenimiento pro-activo como rutinas de inspección dinámicas (RID). Todo método de atención de acciones reactivas puede optimizarse si se implementan sistemas de gestión participativos como el TPM o el Mantenimiento de Primera Línea (FLM – First Line Maintenance).

Un ejemplo interesante de analizar, con gran variación de dotación por períodos, es el de los Ingenios Azucareros. Durante la época de zafra (7 meses aproximadamente) se necesita la mayor disponibilidad posible en el proceso productivo de molienda. La caña de azúcar debe ser cosechada en determinada época para obtener de ella el máximo rendimiento. Los operarios de producción, durante el tiempo de zafra, trabajan en turnos rotativos para cubrir la jornada completa (24 horas). Si la línea de molienda (trapiche) sufre un desperfecto, el mismo personal está en condiciones técnicas de solucionar el problema. Sólo existe una reducida guardia de mecánicos especialistas y electro-instrumentistas para fallos imprevistos de mayor complejidad. El personal de producción tiene la capacidad de realizar mantenimiento de primera línea (mayor cantidad de intervenciones) porque durante el receso (tiempo en que la molienda se detiene) hacen mantenimiento preventivo. Nótese, entones, que se aprovechan al máximo los talentos humanos; las personas que operan las máquinas durante la producción y que efectúan el mantenimiento de primera línea (FLM), son las mismas que realizan, en la época de receso, el mantenimiento integral de los trapiches. El personal se siente dueño de sus equipos y existe un fuerte espíritu de cuerpo.

En las industrias que operan todo el año a jornada completa pueden implementarse turnos de mantenimiento que acompañen a las líneas de producción en tares de apoyo. Sin embargo, es muy importante transferir a los operarios de producción capacidades suficientes para realizar trabajos básicos de mantenimiento. La profundidad que puede lograrse en la transferencia de estas tareas depende de varios factores (ver apartado 7.4.4.1 del Capítulo 7).

Téngase en cuenta que mantener personal de Mantenimiento fuera del horario central, aunque sólo sea para tareas de emergencia, no es barato. Por tanto, si se decide que parte del plantel haga turnos rotativos, hay que estimar el costo de indisponibilidad de los equipos y compararlo con el costo fijo anual de mantener dichos turnos.

Más arriba se dijo que la dotación de Mantenimiento debe estar equilibrada para satisfacer las acciones pro-activas *necesarias* y las reactivas *convenientes*. Pero algunas veces, con la esperanza de optimizar recursos, se rompe tal equilibrio con resultados catastróficos.

Tomemos el caso de una empresa que, sin demasiado análisis, decide reducir la dotación permanente de Mantenimiento. Si el Jefe de Mantenimiento no permite que tal reducción afecte las tareas pro-activas (lo cual sería bastante lógico), probablemente se reduzca la velocidad con que se atienden los pedidos de producción (acciones reactivas). Un correctivo más lento puede impactar en el proceso productivo, agotando las reservas (pulmones) como los stocks de producto semielaborado, los productos en fase intermedia, el almacenaje de materias primas, etc. Con la dotación completa tal vez algunas tareas de mantenimiento preventivo no eran rentables porque el correctivo solucionaba el problema a tiempo, se mantenía el equilibrio y el costo total era menor (el correctivo costaba menos que el preventivo).

Sin embargo, con la merma de dotación se retrasa el correctivo y ahora algunas tareas pro-activas prescindibles se tornan imprescindibles (para alcanzar la nueva confiabilidad requerida) lo que, otra vez, requiere mayor dotación para realizarlas. Esta paradoja ocurre con más frecuencia que la que el lector puede imaginarse y es la causa de los mayores inconvenientes si se reduce personal compulsivamente.

10.2.2 Competencias

Definir las funciones teóricas de un puesto y las responsabilidades que debe asumir quien lo ocupe, y luego cubrir las expectativas con alguien del *mercado*, es relativamente fácil. Luego, en caso de no cumplirse con los objetivos comprometidos, podrá argumentarse que la persona *no daba con el perfil del puesto*. No obstante, el desafío de un buen líder es, en principio, armar un esquema que funcione

con los talentos disponibles. El líder del grupo debe armar una estrategia y una táctica con lo que tiene a primera mano, capacitando, si hace falta, a cada integrante del grupo de acuerdo a sus debilidades. Debe potenciar las fortalezas de cada colaborador y constituir un equipo de hombres comprometidos con sus tareas y con el bienestar general. Éste es el máximo desafío de un líder. No obstante, nadie podría esperar que semejante responsabilidad sea asumida únicamente por la persona responsable del Mantenimiento. Los proyectos de formación y capacitación de mantenedores, se implementan con la colaboración del área de Recursos Humanos.

Tradicionalmente la búsqueda de nuevos colaboradores, o la capacitación de los existentes, se centraba únicamente en aspectos técnicos. Obviamente nunca debe subestimarse la idoneidad, pero tampoco hay que descuidar los aspectos de liderazgo, trabajo en equipo, integración, compromiso, capacidad de trabajo, capacidad de aprendizaje (y desaprendizaje).

10.2.3 Motivación

La persona de Mantenimiento debe estar permanentemente motivada porque su perfil tiene algunas particularidades. Mientras el operario de producción, por lo general, hace tareas repetitivas y rutinarias, el mantenedor es una persona con alto grado de especialización y formación técnica que se encuentra a diario con problemas diferentes. La motivación no es exclusivamente una cuestión salarial; existen muchas otras formas de motivar al personal sin dinero. Esto no significa que la remuneración no deba ser considerada (sobre todo cuando no se alcanzan a cubrir necesidades básicas) para buscar alternativas de motivación, simplemente decimos que no siempre es lo más importante. El mantenedor debe ser reconocido por lo que hace, valorado y escuchado. Debe sentirse orgulloso de su aporte. Sus opiniones y sugerencias deben ser tenidas en cuenta, dándole una respuesta en cada caso.

La capacitación y entrenamiento permanentes son una herramienta de motivación. Algunos piensan, erróneamente, que a mayor grado de entrenamiento transmitido al colaborador, mayor es la posibilidad de perderlo. Además de ser un error de apreciación, es una conjetura mal intencionada que no hace más que quitarle compromiso corporativo a la persona alejándola, aún más, de la identidad de la compañía.

10.2.4 Desempeño

El desempeño está asociado estrictamente a los factores anteriores. Un mal desempeño puede deberse a infinidad de factores, incluso a factores ajenos a la empresa o a la relación de ésta con el colaborador. En la medida que la persona y la ética lo permitan, el líder del grupo debe estar al tanto de los problemas personales de su gente. El trabajador debe sentir que el entorno de trabajo es un marco de contención para él y sus dificultades.

Resulta difícil medir un mal desempeño, incluso hasta puede no tener sentido. Cuando la persona no rinde lo suficiente en su trabajo más tarde o más temprano quedará en evidencia. El superior inmediato debe tomar el problema y estudiar, junto al colaborador, las razones que lo llevan a esa situación y ayudarle en todo lo posible.

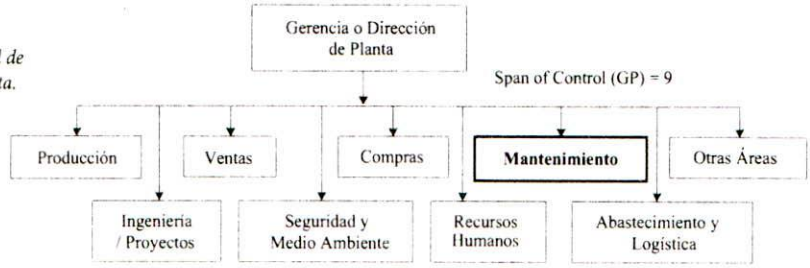
10.2.5 Estructura Orgánica

Estamos obligados, por rigor de la especialidad, a presentar un panorama, aunque más no sea relativo, de las formas más comunes de organizar (enrolar) los talentos humanos que trabajan en el área de mantenimiento. Los esquemas ilustrados tienen algunas particulares que serán abordadas como ventajas y desventajas propias de cada uno. Veamos primero cuáles son los factores que más influyen en el tipo de estructura.

- √ Tipo de proceso productivo (continuo, bach, por lotes, por proceso, etc.).
- √ Tamaño de la Planta y distribución física de los activos.
- √ Situación económica y financiera de la compañía. Situación política de la región.
- √ Tipo de demanda de los productos que se comercializan.
- √ Clase de producto fabricado o servicio prestado.
- √ Oferta de mano de obra en la zona de influencia (calidad - precio - cantidad).
- √ Situación del mercado de los servicios de terceros.

La figura 10.2.2 ilustra un organigrama típico de una industria de proceso. El departamento de Mantenimiento depende, al igual que el resto de las secciones, de la Dirección o Gerencia de Planta. En ningún caso deben tomarse estos esquemas organizativos y sus departamentos como compartimientos estancos. Una estructura eficiente debe lograr una fuerte vinculación entre las funciones más importantes de la organización.

Figura 10.2.2
Estructura tradicional de una Gerencia de Planta.



Puede haber situaciones (conveniencia técnica o productiva) que el líder de Mantenimiento responde directamente al área de Ingeniería y Proyectos, o al departamento de Producción.

Figura 10.2.3
Estructura tradicional de una Gerencia de Planta.

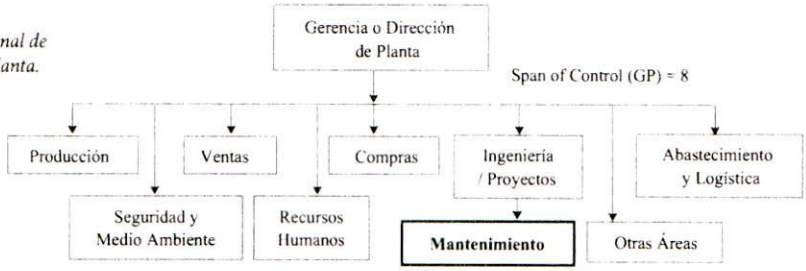
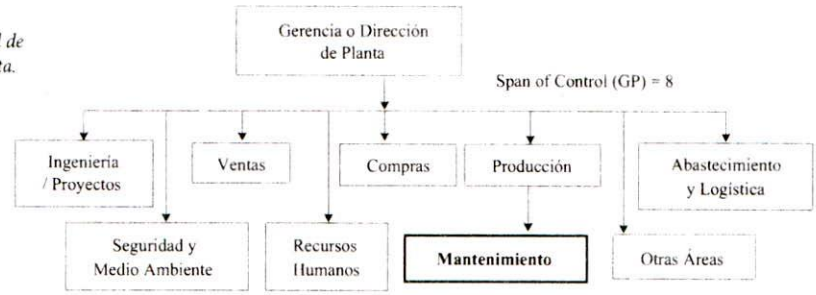


Figura 10.2.4
Estructura tradicional de una Gerencia de Planta.



Antes de planear una optimización del departamento de Mantenimiento debe evaluarse de forma precisa el alcance total de las funciones desarrolladas. En muchas empresas se diseña la estructura en función de las acciones de mantenimiento "puro" y en verdad se hacen trabajos de mejora, modificaciones y proyectos de nuevas instalaciones. En rigor, esta clase de trabajos no corresponden al personal o plantel propio de Mantenimiento en lo que a dotación se refiere. La Dirección de Planta debe entender que los especialistas de mantenimiento, así como sus responsables, tienen como principal misión *preservar las funciones de los activos existentes*; y ninguna de las tareas anexas mencionadas se corresponde con tal misión.

La principal desventaja de este tipo de estructuras es que los colaboradores de un área tienden a descuidar los intereses de las otras y los de la empresa toda. Es responsabilidad de la Dirección de Planta romper estos vicios empresariales promoviendo el trabajo en equipo de sus líderes y estimulando las tareas llamadas transversales.

Así por ejemplo, empleados de un mismo nivel jerárquico como los supervisores, pero de distintos departamentos, pueden trabajar en conjunto en un proyecto común.

Por otra parte, debe evitarse el exceso de permisos verticales. Si un supervisor mecánico debe desconectar una bomba para su reparación, es más rápido que lo solicite directamente al supervisor de producción y no que deba pasar primero por el Jefe de Producción para pedir la detención del equipo. Los pedidos transversales, bien entendidos, mejoran la comunicación entre departamentos y no les quietan participación a los Jefes (aunque muchas veces ocurra este temor infundado).

Independientemente de la posición que Mantenimiento tenga en la estructura de la compañía, sus funciones pueden estar centralizadas, descentralizadas o ser una combinación de ambas.

10.2.5.1 Mantenimiento Centralizado

Bajo un esquema de estas características todas las acciones de Mantenimiento son efectuadas por personal perteneciente a una única área.

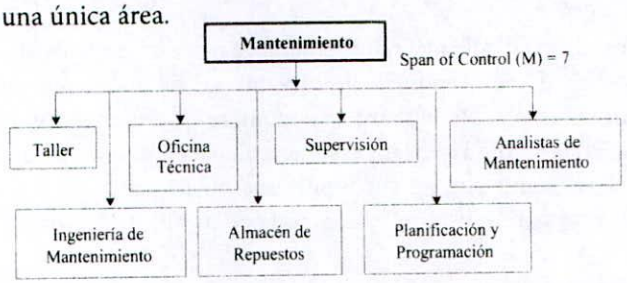


Figura 10.2.5 Estructura tradicional de Mantenimiento Centralizado.

Una estructura con centralización funcional permite disponer de todos los recursos que existen en el área y direccionarlos según la necesidad circunstancial. Además, facilita la planificación, la priorización y la estandarización de tareas. Se respetan los procedimientos establecidos en el sector.

Sin embargo, puede ocurrir un alejamiento de la realidad de Planta (si se compara con las estructuras descentralizadas que están más en contacto con las áreas productivas). En ciertas ocasiones ocurre que el personal no logra adquirir especialización en máquinas específicas por la diversidad de trabajos realizados. Un exceso de centralización puede hacer más lenta la repuesta a pedidos. Sucede lo que se conoce como responsabilidad difusa, *si muchos son responsables de un mismo tema, nadie es verdaderamente responsable*. Además, trasladar herramientas, repuestos y materiales a algunos lugares, puede resultar más difícil y costoso.

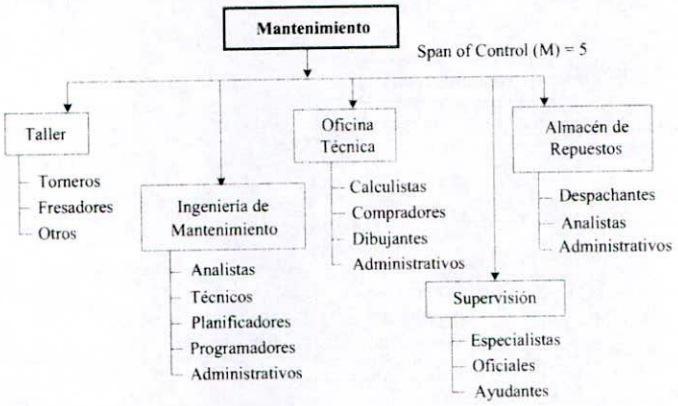
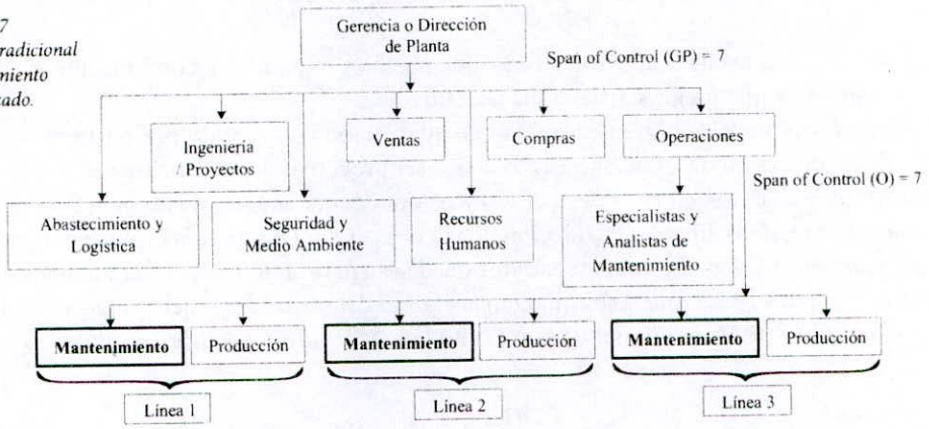


Figura 10.2.6 Estructura tradicional de Mantenimiento Centralizado.

10.2.5.2 Mantenimiento Descentralizado

En contraposición, un área de mantenimiento descentralizado resuelve algunas dificultades del esquema anterior. La figura 10.2.7 muestra un organigrama característico.

Figura 10.2.7 Estructura tradicional de Mantenimiento Descentralizado.



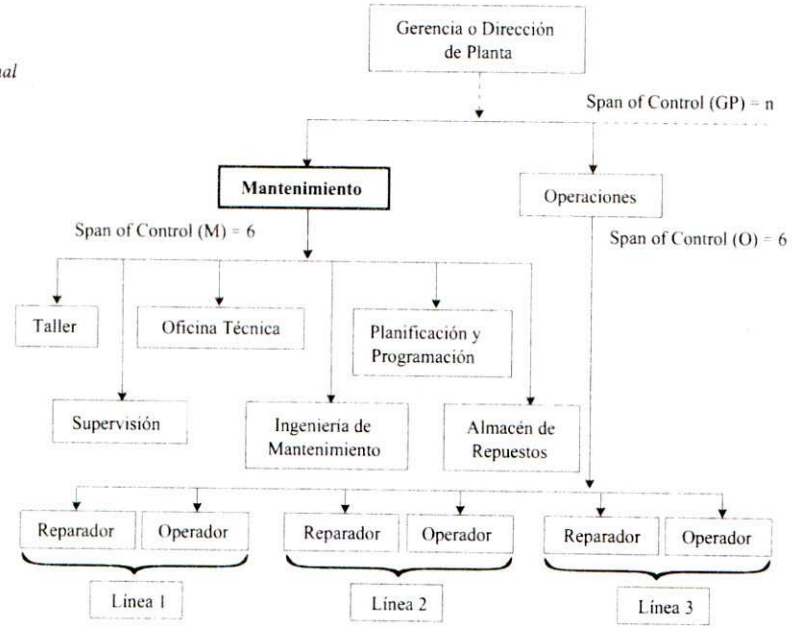
Las áreas descentralizadas se piensan con la finalidad de acercar el mantenimiento al sector productivo. Por este motivo, habitualmente la función del mantenimiento depende de una zona especial llamada Operaciones. En las líneas de producción continuas es común adoptar este esquema (para cada línea se crea un pequeño departamento de mantenimiento). Es útil también cuando los centros de operaciones están muy alejados; cada centro puede considerarse directamente como una Planta productiva.

Se reduce la burocracia administrativa y se aumenta la velocidad de respuesta a los pedidos de producción. Más especialización y dedicación por máquina, menos tiempos muertos por traslado de personas, materiales y herramientas, etc. Sin embargo, se requiere mayor dotación total por la reiteración de funciones en cada línea, en la medida que las personas que hacen mantenimiento no sean las mismas que aquellas que operan. Si se cuenta con personal polifuncional (mantenedor / operador) entonces el número de personas necesarias para satisfacer la demanda de producción y mantenimiento, es menor.

10.2.5.3 Mantenimiento Mixto

Las desventajas del Mantenimiento centralizado y descentralizado pueden compensarse si se opta por una estructura de carácter mixto. Estos esquemas centralizan ciertas funciones específicas y de gestión, y descentralizan las operativas. Se centralizan los trabajos de Taller, Oficina Técnica, Ingeniería de Mantenimiento y Almacén de Repuestos, y se descentralizan las acciones directas de la línea o del proceso. La figura 10.2.8 es una representación de lo dicho.

Figura 10.2.8
Estructura tradicional de Mantenimiento Mixto orientado.



No existe una estructura ideal única. De todos los posibles esquemas y combinaciones, cada empresa debe escoger aquel que mejor satisfaga sus necesidades.

Se requiere alto compromiso y gran capacidad de adaptación (sobre todo por parte de los líderes) para establecer estructuras mixtas. Los empleados deben ser proactivos y polifuncionales por excelencia. Las agrupaciones gremiales deben estar de acuerdo y reconocer que se trata de un beneficio para todos los involucrados. Los responsables de Producción deben ofrecer sus talentos para que sean formados en tareas de mantenimiento y deben estar persuadidos que la estructura mixta les traerá beneficios.

Obsérvese en la figura 10.2.8 que si se conjugan las tareas del reparador y del operador, se tiene una aproximación al modelo de Mantenimiento Autónomo (ver apartado 7.4.4.1 del Capítulo 7).

10.2.5.4 Mantenimiento Basado en Equipos de Trabajo

Las estructuras tradicionales pueden tener vicios inherentes a su propio diseño como son la sectorización de funciones y la escasez de participación. Aún optimizadas, lentifican la toma de decisiones y la adaptación a los cambios. Al demandar poca intelectualidad, es posible que algunos integrantes se conformen haciendo únicamente lo que sus superiores le piden.

En respuesta a ello, hay nuevos modelos de organización que desafían los esquemas tradicionales y proponen alternativas más dinámicas y participativas como son las estructuras de gestión basadas en equipos de trabajo. Conocidas como estructuras TBE (Trabajo Basado en Equipos) buscan obtener de cada colaborador su máximo potencial y creatividad. Facilitan la utilización plena de la capacidad de cada persona y la transmisión de información haciéndola más transversal, rápida y eficiente. Aprovechan la predisposición natural de la gente a asumir cada vez mayor responsabilidad. Promueven la formación y el crecimiento personal. Los colaboradores adquieren más autonomía y asumen la responsabilidad de organizar y distribuir su propio trabajo, evaluar su desempeño, identificar y resolver problemas y adaptarse a las condiciones cambiantes de la organización.

En resumen, una estructura de mantenimiento basada en equipos de trabajo logra:

√ Mejorar el desempeño de la empresa respondiendo más rápidamente a las demandas de sus clientes.
√ Mejorar el aprendizaje y la adaptación al cambio, a través de una intensiva capacitación y entrenamiento polifuncional de todos sus miembros.
√ Mejorar el compromiso, a partir del mayor protagonismo que adquieren los colaboradores en las decisiones importantes de la empresa.
√ Mejorar las relaciones interpersonales, promoviendo el trabajo en equipo y el liderazgo compartido (compañerismo y solidaridad).

La figura 10.2.9 muestra una pequeña estructura organizativa para cubrir las funciones del área de Mantenimiento.

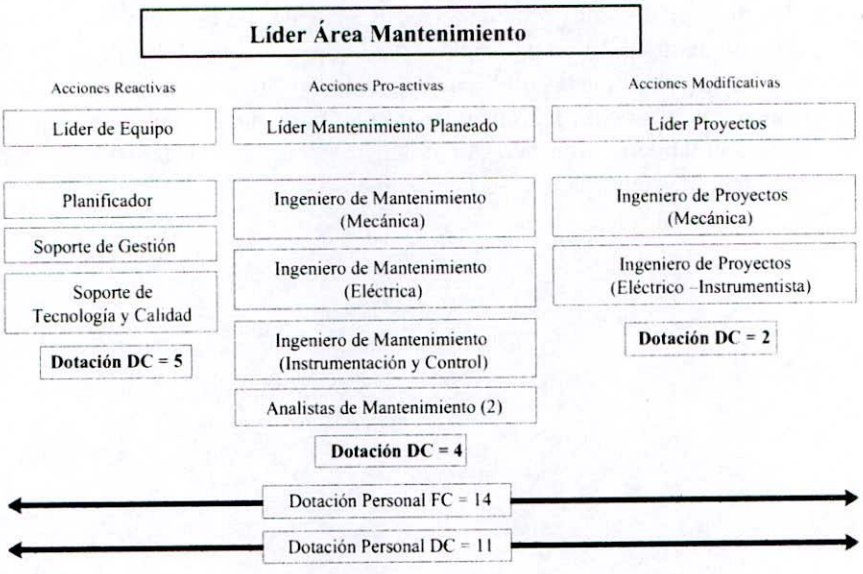
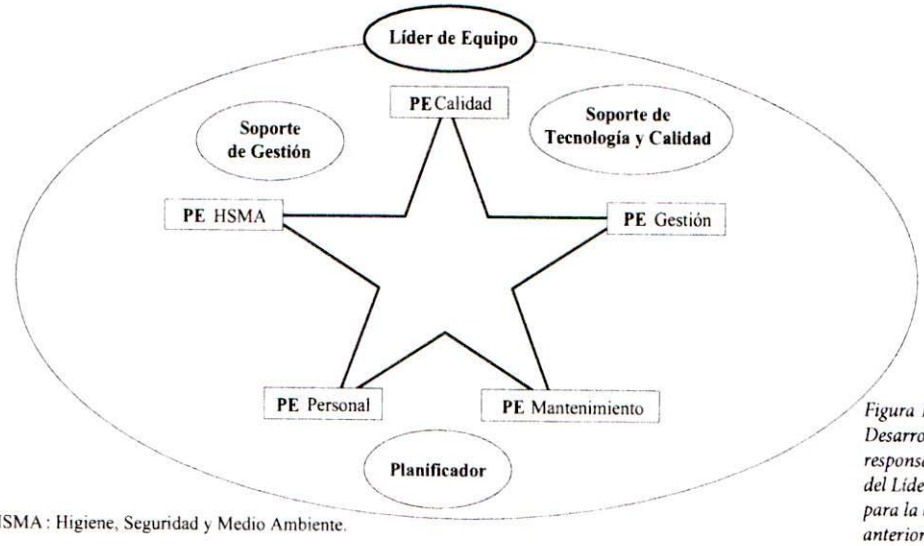


Figura 10.2.9
Ejemplo de una estructura de Trabajo Basada en Equipo para el área de Mantenimiento.



HSMA : Higiene, Seguridad y Medio Ambiente.

Figura 10.2.10 Desarrollo de las responsabilidades del Líder de Equipo para la estructura anterior.

A su vez, la figura 10.2.10 explota la primera columna del área de Mantenimiento (Acciones Reactivas). Obsérvese que la misma se compone de cuatro personas fuera de convenio (FC) y cinco dentro de convenio (DC). El Líder de Equipo reporta al Líder de Área. A su vez, los tres *soportes* (Gestión, Tecnología y Calidad, y Planificación) y los cinco especialistas dentro de convenio reportan al Líder de Equipo. Los especialistas tienen funciones transversales y se llaman *Puntas de Estrella* (PE) en alusión a la forma que representa la distribución funcional.

El PE de Personal, por ejemplo, además de sus tareas de mantenimiento habituales es responsable por el seguimiento y gestión de los índices de desempeño de sus compañeros, de los planes de capacitación y formación, del cumplimiento de los objetivos grupales, etc. Es el referente que tienen sus compañeros sobre los temas relacionados con Recursos Humanos. Es el vínculo entre el grupo y los líderes del área de Recursos Humanos (RRHH).

Tal diseño estructural no exime al Líder de Equipo ni al Líder de Área de responsabilidad alguna. El Líder debe alentar la iniciativa de cada punta de estrella y marcarle las políticas corporativas de su área de incumbencia. Una estructura TBE no da vía libre para que, por ejemplo, el PE de HSMA (Higiene, Seguridad y Medio Ambiente) aplique la política de Seguridad que más le plazca. En realidad el PE debe desplegar las políticas corporativas que le transmite su Líder para que se implementen y cumplan.

Igual criterio de funcionalidad y transversalidad ocurre para todos los temas impulsados por cada punta de estrella (Calidad, Mantenimiento, Gestión, Personal y HSMA).

10.3 Funciones y Responsabilidades

Las funciones son el conjunto de tareas y actividades que realiza el ocupante de un puesto o posición del organigrama para cumplir con los objetivos propuestos. Un puesto demanda de su ocupante tareas, obligaciones y responsabilidades.

Actualmente el término *puesto* ha caído un tanto en desuso porque según ciertas opiniones, se relaciona más con la búsqueda de privilegios (atribuciones y beneficios) que con el logro de objetivos concretos. Para acceder a un puesto eran importantes dos condiciones, la antigüedad y el comportamiento demostrado en las posiciones anteriores (a veces también la *obediencia*). La comodidad que daban los años hacía que el colaborador perdiera iniciativa y proactividad.

Pero los tiempos cambian y hoy se prefieren las funciones a los puestos, la capacidad y el conocimiento a la antigüedad, los Líderes a los Jefes. El Jefe ya no es el que más sabe de las cuestiones técnicas de la "cosa" de fábrica; sino aquel que, teniendo buenos conocimientos técnicos, puede abstraerse de los problemas cotidianos, sobreponerse y plantear soluciones estratégicas eficaces para lograr una gestión integral de mantenimiento. Es quien traza la política del sector, quien marca el rumbo del proceso, quien acompaña a los talentos humanos en su desarrollo personal dentro de la organización, quien hace hacer, quien comparte el éxito desinteresadamente con su grupo, y quien asume la responsabilidad en la adversidad.

Hablar de funciones y responsabilidades libera al colaborador de suspicacias, plantea un modelo de mayor compromiso, fomenta que las personas sean más expeditivas y mejora el desempeño personal.

10.3.1 Posiciones de Mantenimiento

En este apartado se describen las funciones y responsabilidades más importantes de cada posición, tanto para los esquemas tradicionales como para las estructuras transversales.

Gerente de Mantenimiento. Es el referente de mayor jerarquía en el área. Dependen de él todas las personas del departamento. Tiene la responsabilidad de elaborar la política global de mantenimiento que marcará el accionar de los colaboradores y la utilización de los recursos para alcanzar la disponibilidad comprometida de los activos bajo su alcance. Es su responsabilidad el desempeño técnico, económico y administrativo del sector. Es el responsable de organizar los recursos para alcanzar los objetivos corporativos y proponer indicadores de gestión. Aprueba el presupuesto de Mantenimiento, asegura su cumplimiento y explica los desvíos cuando ocurren. Debe disponer los recursos y talentos para que se cumplan los planes de mantenimiento y se resuelvan las fallas imprevistas de acuerdo a las necesidades productivas. Impulsa planes de formación y capacitación para el personal técnico y administrativo. Promueve el bienestar general a través de la motivación y el reconocimiento. Atiende las necesidades laborales y personales de los miembros del grupo. Debe cumplir y hacer cumplir los estándares de calidad y seguridad vigentes. Convoca (con la regularidad conveniente) reuniones de trabajo destinadas a compartir resultados, evaluar oportunidades de mejora, analizar indicadores y delegar tareas.

El Gerente de Mantenimiento (Líder de Área en las estructuras TBE) delega la ejecución de muchas tareas, pero no la responsabilidad de sus resultados.

Jefe de Ingeniería de Mantenimiento. Es el responsable directo de diseñar e implementar la estrategia de mantenimiento más eficaz y eficiente para cada activo de la Planta. Puede tener la categoría de Jefe (estructura tradicional) o de Líder de Mantenimiento Planeado (estructura TBE) y dependen de él los Analistas de Mantenimiento, los Ingenieros de Mantenimiento y todo el personal administrativo del sector. Los Ingenieros y Analistas de Mantenimiento hacen su aporte para que, junto al Líder, se valide la conveniencia técnica y económica de cada plan.

El Jefe de Ingeniería de Mantenimiento propone, o lidera el análisis, de alternativas técnicas para cumplir con los índices de disponibilidad, gasto, seguridad, rendimiento, calidad, etc. Su sector - corazón de la gestión de activos - es el ámbito donde se analizan las oportunidades de mejora y se *diseña el plan de mantenimiento más efectivo para cada activo*. Normalmente un par de colaboradores (ingenieros y/o técnicos) hacen los cálculos y estiman las frecuencias de ejecución para las distintas rutinas de mantenimiento (preventivo, predictivo, detectivo, rutas de lubricación e inspecciones estáticas y dinámicas).

Bajo la gestión del Jefe de Ingeniería de Mantenimiento se encabezan los análisis de falla (ADF's), los estudios RCA o los procesos de mejora como RCM. Por ejemplo, y dependiendo del tamaño de la organización, la figura del facilitador de RCM puede ocuparla el Jefe (o Líder) o un Ingeniero de Mantenimiento idóneo para conducir estas actividades.

Ingeniería de Mantenimiento y su responsable representan el sostén técnico de las acciones proactivas cuyo impacto hace efecto, principalmente, en el mediano y largo plazo de la vida de las instalaciones. Por tanto, desde aquí, sale el modelo de gestión para que el dinero gastado en mantenimiento produzca el máximo beneficio sostenible para el negocio.

En las organizaciones que aplican modelos de administración de activos como el TPM, es el Jefe de Ingeniería de Mantenimiento responsable de apoyar los despliegues de Mantenimiento Autónomo (MA) y capacitar a sus integrantes.

Jefe de Mantenimiento. El Jefe de Mantenimiento (o Líder de Equipo en las estructuras TBE) es la persona encargada de llevar a la práctica las acciones de Mantenimiento diseñadas por Ingeniería de Mantenimiento y responder a la demanda de las reparaciones correctivas con seguridad, calidad y celeridad. Es quien define el criterio para distribuir la fuerza laboral (mano de obra directa) de todo el sector. Resuelve los problemas técnicos que ameritan intervención de su persona. En las estructuras tradicionales, el Jefe de Mantenimiento debe satisfacer los requerimientos de los Supervisores, evaluar sus dudas técnicas, resolver conflictos y atender a empresas proveedoras de servicios o repuestos.

Siendo que la dotación total que depende de él es, por lo general, elevada resulta muy importante definir ajustadamente su Span of Control para evitar saturaciones. En las estructuras transversales, como la mostrada en la figura 10.2.9, la posición la ocupa un Líder de Equipo quien debe asegurar la autogestión plena de los integrantes del grupo. Además, debe orientar, capacitar, motivar y brindar apoyo técnico a los PE.

Ingeniero de Mantenimiento. De acuerdo a su especialidad aporta su conocimiento técnico para cumplir con los objetivos de Ingeniería de Mantenimiento. Trabajando en equipo, diseña el plan de mantenimiento para cada activo. Además, participa de los análisis RCA y RCM.

Analista de Mantenimiento. Las funciones del Analista son verdaderamente importantes. Es quien estudia la disponibilidad de las máquinas y reporta los resultados a través de informes. Es el apoyo técnico-administrativo para los Ingenieros de Mantenimiento y para los grupos de RCM (es la mano derecha del facilitador). Debe contar con una sólida formación técnica e informática. Analiza los fallos ocurridos y sugiere alternativas de mejora para evitar su recurrencia. Habitualmente, es el administrador del sistema informático de mantenimiento (SIM) y del sistema de gestión de stocks (SGS).

Supervisor. La figura del Supervisor se originó en las estructuras tradicionales. Es el referente técnico directo de los especialistas y operarios. Está en contacto permanente con las personas que realizan físicamente el trabajo. Muchas veces participa e interviene en la ejecución. Define la fuerza laboral necesaria para cada tarea de acuerdo a los lineamientos marcados por el Jefe de Mantenimiento. Sus principales funciones son verificar la calidad de los trabajos, evaluar la idoneidad de los miembros de su equipo, asegurar los repuestos, insumos y herramientas necesarias para cada tarea, solicitar los permisos de trabajo y comunicar la finalización de los mismos.

Soporte de Gestión. En las estructuras transversales el Soporte de Gestión reporta al Líder de Equipo y, en algunos casos, también al Líder de Mantenimiento Planeado. Siendo que el área de Acciones Reactivas ya no es únicamente un sector ejecutivo (figura 10.2.9), esta persona centraliza, procesa y distribuye la información de gestión (reportes, indicadores, informes, etc.).

Prepara información para el Líder de Equipo y/o Área usada en reuniones de Gerencia u otros eventos. Consolida la información para confeccionar el presupuesto de mantenimiento, evaluar los gastos de terceros, analizar horas extras, calcular el consumos de repuestos y materiales, etc. Debe poseer habilidad para manejar herramientas informáticas de cálculo y generación de reportes. Dentro de sus funciones se encuentra la coordinación de las reuniones de trabajo que realizan los miembros del equipo y que lidera el Líder de Equipo.

Soporte de Tecnología y Calidad. En estructuras transversales, es la persona encargada de los temas tecnológicos relacionados con la Calidad. Reporta directamente al Líder de Equipo y verifica en campo que los procedimientos de mantenimiento (ejecución de tareas) respondan a los estándares de calidad y seguridad vigentes. Además, tiene una fuerte relación funcional con los Ingenieros de Mantenimiento porque, junto a ellos, evalúa la necesidad de cambiar piezas o materiales, mejorar procedimientos de trabajo y optimizar frecuencias de inspección. Además, lidera las auditorias de cumplimiento de procedimientos de trabajo.

Planificador. Sobre el área ejecutiva recae gran cantidad de trabajo. Por un lado, todas las directivas de mantenimiento pro-activo y, por otro, todas las acciones reactivas que surgen a diario de manera imprevista. El Planificador colabora con el Jefe de Mantenimiento o Líder de Equipo para coordinar y planificar la carga de trabajo según las prioridades y capacidades del sector. Es la persona que regula la carga de trabajo en función de la capacidad ejecutiva que tiene el área. Planifica las rutinas de mantenimiento preventivo y las acciones reactivas, y asegura la disponibilidad de repuestos y herramientas para cada trabajo. Su función es clave para el mejor aprovechamiento de los recursos.

Líder de Proyectos. El Líder de Proyectos puede aparecer en las dos clases de estructuras. Reporta directamente al Gerente de Mantenimiento (ó Líder de Área Mantenimiento) y es responsable de programar, planificar, coordinar, ejecutar y controlar las inversiones de la Planta que están a cargo del departamento de Mantenimiento. Vale la última aclaración porque puede existir un departamento de Proyectos ó Ingeniería encargado de las grandes inversiones.

La mantenibilidad es un factor importante a considerar en los proyectos de mejora. El Líder de Proyectos debe asegurar que toda modificación tendiente a optimizar una instalación no termine perjudicando el proceso de mantenimiento y reduciendo la mantenibilidad.

Su objetivo es, entonces, cumplir con los plazos acordados, no exceder los presupuestos, lograr el resultado esperado y no afectar la mantenibilidad de las instalaciones modificadas.

Ingeniero de Proyectos. Si la estructura de Mantenimiento es grande, el Líder de Proyectos de Mantenimiento puede contar con la colaboración de otros ingenieros especialistas según las distintas disciplinas como muestra la figura 10.2.9. Los Ingenieros de Proyectos tienen mucha relación con el departamento de Compras y se encargan de confeccionar las especificaciones técnicas para la adquisición de obras, servicios y materiales. Una vez implementadas las mejoras, el Ingeniero de Proyectos debe evaluar el resultado de las mismas y elevar un informe al Líder de Proyectos.

Técnicos, especialistas y operarios de Mantenimiento. El personal directamente afectado a la ejecución de los trabajos se compone de técnicos, especialistas, idóneos y operarios. Estas personas son fundamentales para satisfacer la demanda de trabajo y asegurar la disponibilidad de los equipos. Deben ser competentes en sus actividades y comprender la importancia de lo que hacen. Deben ser expeditivos, hábiles y estar comprometidos con el funcionamiento de los equipos que atienden. Siendo que están en contacto permanente con las máquinas, no deben dejar pasar ningún detalle; *son los ojos de Mantenimiento frente a la máquina*. Deben mantener la prolijidad y el orden, y ser pulcros en sus tareas para garantizar la seguridad y la calidad.

Su máximo desarrollo lo alcanzan cuando pueden detectar e identificar causas de fallas (diagnosticar) y transmitir su percepción a los demás con total claridad. También cuando son capaces de determinar con exactitud si la máquina opera correctamente.

El máximo aprovechamiento de sus capacidades y fortalezas se obtiene cuando encuentran un referente confiable (líder). Como todos, deben tener sus necesidades básicas satisfechas, estar motivados y sentirse parte integrante del grupo. Son quienes, en definitiva, terminarán solucionando los problemas y desplegando las políticas y estrategias del departamento.

En las estructuras TBE estas personas aumentan su participación. Algunos asumen la responsabilidad de ser punta de estrella (PE). Cada individuo es designado según su afinidad y capacidad para manejar ciertos temas (ver apartado 10.2.5.4).

Las especialidades más frecuentes del área de mantenimiento se listan a continuación.

√ **Mecánica**

- Montador
- Ajustador
- Especialista hidráulico
- Especialista neumático
- Mecánico automotríz / máquinas viales
- Soldador
- Cañista
- Bombista
- Fumista
- Lubricador
- Tornero, fresador, etc.
- Pintor

√ **Electrónica / Electricidad**

- Media y Baja tensión
- Alta tensión
- Electricista
- Especialista en Sistemas de Control
- Bobinador
- Clableador
- Especialista en Informática
- Especialista en Telecomunicaciones
- Técnico en refrigeración y aire acondicionado

√ **Instrumentación**

- Instrumentista
- Metrólogo Calibrador
- Especialista en señales
- Programador

Es de imaginarse que no en todos los casos es necesario contar con todas las especialidades citadas. Hay situaciones que es suficiente con un par de subespecialidades. El resto del trabajo podría efectuarse contratando servicios externos temporarios.

La polifuncionalidad del personal técnico (llamada polivalencia) reduce dotación y gastos de mantenimiento.

Responsable del Almacén de Repuestos. Es quien tiene bajo su responsabilidad el stock del material técnico. Por lo general reporta al Jefe de Ingeniería de Mantenimiento o directamente al Gerente de Mantenimiento (en estructuras tradicionales). Su grupo de trabajo se encarga de asegurar la existencia de los repuestos de acuerdo a los parámetros de control de stock establecidos. Su responsabilidad alcanza a los repuestos de consumo conocido como a los de consumo incierto (ver Capítulo 9). Pueden colaborar con el Responsable de Almacén, un Despachante, un Comprador Técnico y una persona que verifique la calidad de los productos recibidos.

10.3.2 Comentarios sobre Liderazgo

Ya hemos mencionado la importancia del liderazgo en las estructuras de mantenimiento. No obstante, cabe resaltar algunas consideraciones más.

Todo proceso de gestión que pretenda compromiso, colaboración y motivación de la gente, únicamente es posible con un fuerte liderazgo de su conductor. El líder es una persona que logra coordinar con éxito los talentos de su grupo; y no aquel que imparte órdenes y manda a sus colaboradores aplicando herramientas coercitivas. Es quien consigue el respeto de sus seguidores a través del ejemplo, estimula la cooperación entre los miembros de su equipo y respeta los compromisos asumidos. Un líder respeta a sus pares y reconoce el talento de sus colaboradores atendiendo sus ideas y sugerencias. El líder de un equipo de trabajo respeta y considera la forma de pensar de cada integrante, confía en ellos y fomenta el pensamiento crítico constructivo librándolos del temor a ser mal interpretados.

Una característica importante del líder es su capacidad de comunicación y negociación. Un buen líder escucha todas las opiniones e informa permanentemente a los colaboradores acerca de la situación de la empresa y del departamento de mantenimiento. Tiene que tener la capacidad de hacerse comprender. La comunicación entre el líder y los liderados debe ser en ambos sentidos, fluida y estimulada por el propio líder. El líder debe favorecer la participación sin perder de vista el liderazgo y el respeto personal. El líder no es el amigo confesor de los problemas de la gente ni debe fomentar el *amiguismo*, es quien escucha pero marca la diferencia a la hora de tomar decisiones pues, en definitiva, es sobre él que caerá la responsabilidad de las acciones realizadas y las decisiones tomadas.

El líder crea un clima agradable y distendido de trabajo, pero a la vez exigente y con metas claras y cumplibles; un líder es una persona *seria*. Una persona seria no es aquella que no se ríe: *para ser verdaderamente serio hay que reírse lo suficiente*. Una persona seria, ante todo, se maneja con reglas claras y sin trampas.

El líder fomenta el entrenamiento en el puesto de trabajo y la autogestión. Es el mentor del grupo y enseña a hacer, marca el rumbo de la formación y la capacitación. Todo líder acuerda un plan de acción para cada problema, mide su avance y celebra los éxitos con los demás. El líder no adopta una postura sobreprotectora, sino que transmite seguridad y transparencia para que el colaborador comprenda los problemas y asuma la responsabilidad de resolverlos.

Es sencillo darse cuenta que la figura de *Líder* es bastante más completa que la de *Jefe*. Si bien un líder puede y debe trabajar sus debilidades, el liderazgo no es una condición fácil de adquirir; generalmente es innato a la persona.

10.3.3 Comentarios sobre Span of Control

El término Span of Control (SOC) significa espectro de control. Es la cantidad de colaboradores directos que reportan a un superior (Jefe, Gerente o Director) en la estructura jerárquica. Indica indirectamente la cantidad de posiciones directivas por nivel que tiene la organización. A mayor cantidad de puestos, cada uno controla y lidera menos gente (menor SOC), y la estructura es más angosta y vertical. La figura 10.3.1 es un esquema cuyo Span of Control, para el Nivel 2, es de dos personas ($N_2 = 2$).

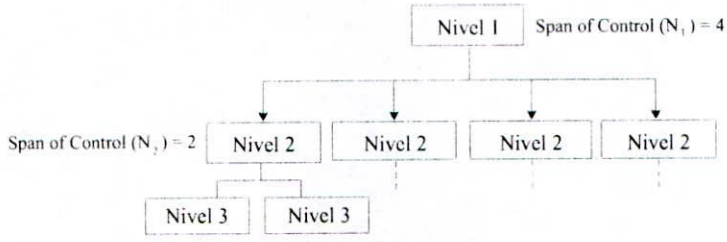


Figura 10.3.1 Estructura hipotética con SOC = 2 para un mando del Nivel 2.

Por el contrario, si hay menos posiciones intermedias, a cada una le reportarán más colaboradores y el Span of Control será más amplio. Ver figura 10.3.2 ($N_2 = 4$).

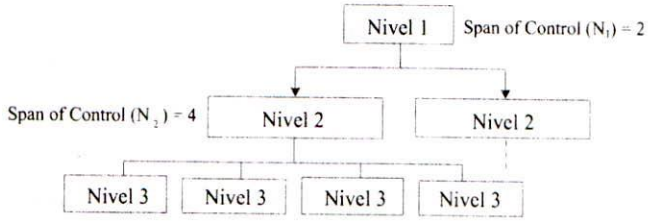


Figura 10.3.2 Estructura hipotética con SOC = 4 para un mando del Nivel 2.

El Span of Control depende, entre otras cosas, del tipo de actividad productiva y del nivel de formación y desarrollo de los colaboradores. A mayor complejidad tecnológica, mayor será el grado de supervisión necesario a ejercer sobre cada colaborador, con lo que el Span of Control disminuirá. Por el contrario, si disminuye la complejidad, mayor es la cantidad de gente que puede supervisarse simultáneamente y el Span of Control aumentará. De igual forma, si aumenta el nivel de capacitación y formación de los colaboradores se necesitará menos supervisión y el SOC podrá aumentarse (personal más autosuficiente).

Un bajo SOC agiliza el intercambio de información (entre líder y colaboradores) y permite que los colaboradores tengan un contacto más directo con su jefe. Sin embargo, son necesarias más posiciones intermedias, lo que aumenta los gastos fijos de la estructura de mantenimiento.

Para aumentar el SOC de un puesto es preciso que la persona que lo ocupa cuente con las capacidades para coordinar el trabajo de mayor cantidad de empleados y pueda manejar con éxito esa dificultad.

Mayor SOC por puesto tal vez repercuta en un número menor de niveles intermedios y la pirámide se hará más baja. Paradójicamente, esto facilita la transmisión de información entre el máximo nivel directivo y los empleados de menor jerarquía (parte baja de la pirámide). Por consiguiente, los gastos fijos totales serán menores.

Pasar a esquemas de mayor SOC no es sencillo ni puede resolverse de un día para el otro. En principio es necesario capacitar y formar al personal para que sea más autosuficiente y con real poder de decisión y autogestión.

10.4 Crecimiento de Talentos

El desempeño del personal de mantenimiento es fundamental para la gestión de activos. Cierta cantidad de fallas ocurridas en los equipos son causadas por errores humanos que cometen tanto el personal operativo como el personal de mantenimiento. Afortunadamente estos modos de falla no constituyen la mayoría.

Los errores humanos[1] pueden ser voluntarios o involuntarios. Los voluntarios ocurren por equivocación o por contravención. Las fallas por equivocación surgen, por ejemplo, cuando se hace mal una tarea pensando que se hizo bien (procedimiento equivocado). Una contravención es una acción cuya intención es causar un daño. Por su parte, los errores involuntarios pueden obedecer a olvido, cansancio o distracción.

La competencia adquirida por un colaborador de mantenimiento es importante para no cometer errores, y puede medirse en función del grado de habilidad que tiene para desempeñarse con seguridad y calidad en su trabajo. Los responsables de Mantenimiento deben medir y mejorar continuamente las competencias de su personal (téngase en cuenta que una acción negligente puede poner en riesgo la integridad física de las personas y las instalaciones).

Los planes para mejorar competencias o comportamientos involucran a la propia persona y a un mentor quien lo conducirá y guiará en el proceso de crecimiento. Ambas partes deben acordar un plan de acción y asumir compromisos recíprocos. El objetivo final es que la persona *sepa hacer y conducirse* en el ámbito laboral según los estándares técnicos y éticos previstos por la organización.

10.4.1 Capacitación

Las máquinas e instalaciones son cada vez más sofisticadas y complejas, lo que demanda un sólido conocimiento técnico de los que la atienden. La capacitación permanente en el área de mantenimiento es casi obligatoria.

En muchas organizaciones suele observarse que ante la adquisición de nueva maquinaria, el personal se auto-capacita conforme van apareciendo los problemas. Este método no es del todo malo: *lo aprendido a la fuerza y en el campo, nunca se olvida.* Sin embargo, encierra muchos riesgos que pueden afectar la seguridad, la disponibilidad y los gastos. Aprender sin conocer los peligros de una máquina, es verdaderamente arriesgado. La compra de una nueva instalación debe incluir la capacitación necesaria para operarla y mantenerla (ver apartado 7.4.4.4 "Pilar - Gestión Temprana" del Capítulo 7).

Es interesante definir el nivel de capacitación en el que deseamos ubicar a nuestros colaboradores. El proceso de aprendizaje comprende cuatro etapas[2]. Cuando la persona se acerca a una nueva actividad se dice que está en la etapa de *incapacidad inconsciente* (II) porque es incapaz de hacer la tarea pero, además, ignora el grado de dificultad (no es consciente de la dificultad a la que se enfrentará). Conforme comienza a incorporar conocimientos o habilidades, pasa a la etapa de *incapacidad consciente* (IC) porque, si bien no puede hacer la tarea por sus propios medios, comienza a tomar conciencia de la dificultad. La tercera etapa se denomina de *capacidad consciente* (CC) porque ya puede hacer la tarea por sus propios medios pero debe prestar mucha atención, pensar cada movimiento, ayudarse de guías, hacerlo junto al tutor, etc.; vale decir, tiene los conocimientos recientemente incorporados y adolece de seguridad y confiabilidad para hacer la tarea por sí mismo. La última etapa (ideal) es aquella de *capacidad inconsciente* (CI); la persona domina totalmente la tarea y la hace inconscientemente con baja posibilidad de cometer errores. Para acceder a esta última etapa se requiere de mucha práctica y entrenamiento (ver apartado 7.4.4.6 "Pilar - Capacitación y Desarrollo" del Capítulo 7).

Las áreas de conocimiento y/o habilidad por las que debe pregonar el área de mantenimiento, gestionando las necesidades con ayuda del área de Recursos Humanos son, entre otras:

- √ Perfeccionamiento en las tareas específicas de rutina
- √ Manejo del riesgo (cuidado del Medio Ambiente y de la Seguridad Personal)
- √ Tribología y técnicas de lubricación
- √ Análisis de vibraciones y termografía
- √ Ensayos no destructivos
- √ Principios de electricidad y magnetismo
- √ Trabajo con riesgo eléctrico e instalaciones peligrosas
- √ Programación de Sistemas de Control
- √ Diagnóstico de fallas y Análisis de Fallas

---

1 Se recomienda consultar el Apéndice 2 "Error Humano" del libro RCMII de John Moubray (ver bibliografía).

2 También conocida como "Escala del Aprendizaje", forma parte de las técnicas de programación neurolinguísticas.

√ Gestión de modos de falla (FMEA, RCM, etc.)
√ Sistemas de medición (metrología) y calibración
√ Mecanismos y elementos de máquinas
√ Manejo de herramientas de mano y máquinas herramientas

10.4.2 Desarrollo

El desarrollo profesional y/o laboral de una persona es una labor permanente que debe llevar adelante el responsable máximo de Mantenimiento y el departamento de Recursos Humanos. Esto es así porque las condiciones técnicas, laborales y estratégicas del negocio cambian permanentemente. La organización se beneficia si cuenta con índices elevados de desarrollo, pero debe promover la motivación. No hay desarrollo posible sin motivación.

Dotar al personal de mantenimiento de aptitudes polivalentes, es parte de su desarrollo. Suele argumentarse que el personal polivalente carece de especialización. Sin embargo, puede haber personal muy especializado en sus tareas rutinarias y que, además, posea cierta habilidad para otras que aplica sólo en casos de emergencia. Si bien no es lo más aconsejado (pues puede retroceder al estado de capacidad consciente), al menos su aporte servirá de apoyo si fuese necesario reforzar la dotación en esa especialidad.

En general, el personal de Mantenimiento es propenso a incorporar conocimientos de otras disciplinas. Podrá haber algún reclamo de compensación económica pero, aún en esos casos, se prestan cordialmente al desarrollo. El mundo avanza y nadie puede negar que si el personal se encuentra más capacitado es un beneficio tanto para la organización como para el propio colaborador.

Los tiempos muertos que ocurren cuando hay un límite muy fuerte entre especialidades, es tremendo. El caso más emblemático y ejemplificativo mencionado por cientos de autores es el de los reemplazos de motores eléctricos. Producción denuncia un problema en una máquina, personal del sector eléctrico acude al lugar y resuelve que es necesario sustituir el motor. Se emite el permiso de trabajo correspondiente a cargo del personal de producción y personal del área eléctrica lo desconecta. Luego mantenimiento mecánico tiene que desmontar el motor. A continuación se le solicita al departamento eléctrico que consiga en el Almacén un motor de reemplazo. Mantenimiento mecánico monta el motor y recurre nuevamente al sector eléctrico para que haga la reconexión correspondiente.

Con personal polivalente (polifuncional) muchos de los trámites de pedidos y avisos se eliminarían y el tiempo total para realizar la tarea sería menor.

El proceso hacia la polifuncionalidad se inicia negociando con los representantes gremiales las condiciones del nuevo proyecto. Tal vez sea necesario revisar las categorías, los incentivos y el régimen de promoción de los empleados. Acordado el aspecto político-económico, se seleccionan las tareas a *polifuncionalizar* de acuerdo a cada especialidad, se prepara el esquema de transferencias y se eligen las personas más idóneas para asegurar el éxito del programa. Luego, se comunica y lanza una prueba piloto - habitualmente de mediano plazo - y se observan los resultados. Se realizan las correcciones convenientes y se replica la experiencia en otras áreas o conjunto de tareas.

10.4.3 Evaluación

Existen infinidad de métodos para medir el desempeño de una persona. Siendo que escapa al objetivo de este trabajo profundizar sobre esta materia, sólo diremos que lo primero, aunque no lo único, de las evaluaciones de desempeño es identificar las fortalezas y debilidades de los empleados.

Las primeras deben ser destacadas y reconocidas; las debilidades hay que tomarlas como oportunidades de mejora. La brecha entre lo que la persona *debe hacer* y *hace*, debe reducirse a través de programas de formación, capacitación o coaching (individual o grupal).

Una evaluación de desempeño no es un examen ni una búsqueda de errores; es el ámbito donde colaborador y líder (a solas) intercambian ideas, manifiestan sus inquietudes y plantean sus necesidades. El único patrón de referencia es el propio colaborador. La evaluación de desempeño no mide la habilidad del colaborador con respecto a otro u otros colaboradores; es la medición contra sí mismo. Es evaluar los progresos y los logros de la propia persona. Además, es útil para analizar la evolución de algún proyecto personal y ayudar a la persona a que logre su objetivo. Las entrevistas sinceras y expeditivas permiten acercar posiciones y motivar al empleado.

10.5 Tercerización del Mantenimiento

Gran parte del trabajo realizado por el departamento de Mantenimiento se resuelve incorporado mano de obra temporaria ajena al plantel estable del organigrama o contratando los servicios especiales de empresas o profesionales. Esta es una problemática que, en mayor o menor medida, afecta a la mayoría de empresas.

10.5.1 Razones de la Tercerización

Varias son las razones por las que una empresa puede optar por contratar servicios externos. Una posible causa es la explotación de equipos de gran complejidad. Para atender estas máquinas se necesita la asistencia de personal altamente capacitado. Estos especialistas, por lo general, se encuentran fuera de la empresa; es más, no sería técnica ni económicamente conveniente capacitar al personal propio para realizar estos trabajos por dos razones. Primero que la experiencia de nuestro personal, aún bien formado, sería escasa y limitada a un universo pequeño de máquinas; sólo acumularían experiencia con las pocas máquinas de Planta. Contrariamente, los especialistas externos se nutren de un universo mucho más amplio de equipos, lo que les otorga mayor experiencia (poseen mayor capacidad inconsciente).

Además, tenemos la inconveniencia económica: formar especialistas que puedan atender pocos equipos sería muy costoso y sus habilidades se aprovecharían sólo ocasionalmente.

Lo anterior no significa que hay que desatender por completo las tareas que sobre nuestros activos realizan las empresas contratadas; es más, recomendamos *involucrarse* de lleno en tales actividades porque el mejor plan de mantenimiento de un equipo sólo es posible si trabajan en conjunto, los usuarios, el fabricante y, obviamente, las personas que lo mantienen.

La segunda razón para optar por la tercerización es cuando los equipos se encuentran en su período de garantía. Aún contando con capacidad técnica, puede resultar obligatorio recurrir al fabricante o proveedor de la máquina para que, durante algún tiempo, haga el mantenimiento. De todas formas, el personal de mantenimiento debe estar en contacto con los especialistas externos durante los trabajos, para incorporar las competencias necesarias en el futuro.

Otra causa importante para tercerizar es la carga instantánea de trabajo. Es una de las razones más discutidas en los ámbitos empresariales. La estructura de mantenimiento se diseña, por lo general, para la media de demanda pro-activa y reactiva. Para los picos de demanda hay dos caminos posibles: retrasar la respuesta a algunos requerimientos o contratar la fuerza laboral faltante. Según el nivel de indisponibilidad tolerado, se elegirán una de las dos alternativas.

La reducción de gastos fijos es otra de las razones para tercerizar. En algunas circunstancias, los gastos que insume el personal propio son tan elevados que las empresas prefieren suplir la mano de obra propia con mano de obra contratada. De esta forma, se puede reducir el plantel estable de la estructura de mantenimiento. No obstante, la sustitución deliberada de mano de obra propia por personal externo puede poner en peligro la seguridad de las instalaciones y la calidad del trabajo, por lo que tal vez sea necesario mayor nivel de supervisión.

Finalmente, otro motivo que probablemente requiera contratar fuerza laboral externa, son los eventos de gran envergadura como las Paradas de Planta. La dotación estable es insuficiente para hacer frente, en el breve tiempo de una Parada de Planta, a todos los trabajos previstos de mantenimiento pro-activo y reformas o modificaciones que siempre surgen. En estos casos, casi no hay alternativa que acudir a mano de obra externa o servicios especializados. Además, si la decisión fuese contar con un plantel estable lo suficientemente grande para soportar una Parada de Planta, el mismo sería inutilizado durante el resto del año. Ver sección 8.5 "Grandes Reparaciones", Capítulo 8.

En general, la diversidad tecnológica industrial condujo a un nivel de especialización tal que hoy es casi impracticable armar una estructura de mantenimiento capaz de cubrir todas las especialidades. Más bien son pocas las especialidades con las que cuenta la estructura estable de cualquier empresa.

Tal vez una excepción la constituyan las empresas alejadas de los polos industriales que podrían tener que pagar un sobreprecio por los mayores costos de traslado. Sin embargo, han mejorado tanto los sistemas de comunicación que hoy puede no ser ésta una limitación para la tercerización de servicios.

Algunos ejemplos de servicios habitualmente tercerizados se describen a continuación.

- √ Identificación y diagnóstico de fallas potenciales y búsqueda de fallos ocultos. Análisis de Vibraciones, Ultrasonido, Termografía Infrarroja, Emisión Acústica, Radiografía Industrial, Análisis de Aceites, mantenimiento de instalaciones contra incendios, control de sistemas de seguridad, etc.
- √ Reparación de equipos de tecnología avanzada (compresores, transformadores, sistemas de control, refrigeradores, generadores, etc.).
- √ Provisión de mano de obra especializada y su eventual supervisión.
- √ Mantenimiento de parques y jardines.
- √ Trabajos de pintura, fumistería, aislación térmica, reparación de válvulas, fabricación de piezas especiales, reparación de bombas, etc.
- √ Limpieza hidrocinética (agua a alta presión) de equipos, suelos y cañerías.

Sea cual fuere el motivo por el cual la organización decide contratar mano de obra o servicios de terceros, es muy posible que se incremente la necesidad de supervisar esos trabajos. Estas funciones, por lo general, son cubiertas por Supervisores, Inspectores de Servicios, Líderes de Equipo o bien por personal dentro de convenio con habilidades técnicas suficientes. Cuanto menor es el grado de especialización y capacitación de la mano de obra contratada, mayor será la cantidad de horas hombre destinadas a supervisar los trabajos que realizan.

10.5.2 Contratos para Servicios de Mantenimiento

Cualquiera sea el tipo de contrato, la empresa tomadora del servicio debe establecer con total claridad la finalidad del mismo, qué tareas se contratarán exactamente, qué se espera del prestador, las especificaciones técnicas que regirán el contrato, el alcance preciso de cada trabajo, las condiciones legales que lo regularán, las cláusulas de rescisión, los impuestos y punitorios si los hay, la forma de medir el avance, terminación y calidad de los trabajos, el plazo de ejecución, la responsabilidad de cada una de las partes, la forma de pago o cancelación de compromisos, la provisión de herramientas, materiales y repuestos, las normas de seguridad vigentes, etc.

Una clara declaración del alcance, así como una correcta especificación de los trabajos, evitan o minimizan la cantidad de *adicionales*. Este es un factor importante a tener en cuenta porque algunos oferentes cotizan precios bajos para tener más posibilidades de salir beneficiados en la adjudicación, pero luego, compensan el precio global con los trabajos *adicionales* facturados. El sector administrativo y técnico de la contratante deben estar alerta de este tipo de accionares.

Ambas empresas (contratista y contratante) deben construir una fluida relación profesional. El departamento de Mantenimiento debe entender que la empresa *comienza en el proveedor y termina en cliente*. Por lo tanto, el desempeño de contratistas y proveedores (sobre todo el de aquellos con mayor nivel de actividad en la Planta) depende, en gran medida, de la empresa contratante. El modelo de gestión y los estándares de seguridad, cuidado del medio ambiente y calidad, deben ser transmitidos al proveedor para que éste pueda ajustarse a las necesidades de la empresa. Hay empresas que asisten técnica y administrativamente a sus proveedores porque consideran que éstos deben estar en condiciones de funcionar bajo el mismo modelo de gestión. Incluso algunas dictan cursos gratuitos de capacitación y formación para los líderes y empleados de la compañía contratista.

Son muchos los tipos de contratos que se usan, haremos una breve descripción de los mismos, enumerando sus ventajas y desventajas.

10.5.2.1 Contrato de Horas-Hombre por Administración

Consiste en acordar, a través de un contrato por tiempo determinado, el precio unitario de la hora-hombre por especialidad y categoría. La contratista *entrega* a la contratante una dotación determinada de personas que responderán temporalmente a la supervisión de Planta. Los gastos asociados con la relación de dependencia de los empleados los asume la empresa contratista. En algunos casos el contrato también establece el alcance de las tareas. El pago de las horas trabajadas se hace en forma quincenal o mensual según lo establezca el contrato.

El nivel de competencias y habilidades de las personas contratadas debe estar a la altura de las necesidades de la contratante, como su conducta y comportamiento en el establecimiento. Incluso, en ciertas ocasiones, los contratados reciben la misma instrucción y capacitación que los empleados de Planta en materia de seguridad, cuidado del medio ambiente y calidad.

Esta modalidad de contratación puede generar conflicto con las agrupaciones sindicales. Además, obliga a llevar un estricto control de las horas por parte de la contratante.

10.5.2.2 Contrato por Unidad de Trabajo

Bajo esta modalidad, las partes celebran un contrato en el que convienen un importe unitario por unidad de trabajo mensurable. Se utilizan medidas disgregables como el metro cuadrado, el metro lineal o, directamente, cantidad de equipos inspeccionados, puntos lubricados, piezas montadas o desmontadas, etc. El contrato nada dice en relación a la cantidad de personas que la contratista usará para efectuar los trabajos, simplemente menciona el nivel de calidad esperado, en cuyo caso se deberá proveer el personal idóneo para cumplir con esos requisitos. Dependiendo de la estructura de costos, del costo de la gestión de compras y del costo administrativo de la compañía contratante, puede optarse por incluir o no la provisión de materiales. La supervisión directa del personal es ejercida por la contratista, mientras que la contratante inspecciona la calidad final y el cumplimiento de los trabajos.

Ejemplos de este tipo de contrataciones se observan en *servicios de aislación térmica* (por tipo de accesorios, metros cuadrados y metros lineales en cañerías), *servicios de pintura* (por metro cuadro, tipo de aplicación y tratamiento superficial), *lubricación de máquinas* (por cantidad de puntos lubricados), *rutas de análisis de vibraciones* (por punto inspeccionado y diagnosticado), *rutas de termografía infrarroja* (por punto inspeccionado y diagnosticado), etc.

Obsérvese que alguno de estos servicios son rutinarios (ej: análisis de vibraciones) y otros son no rutinarios (ej: servicios de aislación térmica).

Una modalidad más elaborada son las Órdenes de Compra Abiertas (OCA). Son contratos en los que se pacta anual o semestralmente el precio unitario de cada una de las tareas previstas (disgregadas) pero no se asegura la cantidad que se consumirá de cada ítem. Esta modalidad evita la evaluación de ofertas para cada trabajo. Directamente se realiza una compulsa de precios inicial y se firma dicha OCA con la empresa que salió beneficiada. La contratista se compromete a respetar el precio por el tiempo que dura el contrato y a facturar únicamente las cantidades efectivamente certificadas por los responsables de Planta. La empresa contratante se compromete a solicitar todos los trabajos del rubro a la empresa beneficiada. Además, la contratante no tiene contacto directo con los operarios; sólo con el Supervisor de la contratista.

Los contratos que prevén servicios regulares de diagnóstico de fallas como los análisis de vibraciones o la termografía, tienen algunas particularidades que merecen destacarse. Un programa de mantenimiento predictivo es más que recolectar datos, almacenarlos en una base de datos y armar carpetas con gran cantidad de gráficos. Un prestador de servicios predictivos debe, antes de iniciar la recolección de datos, estudiar a fondo cada máquina. Pedir a la contratante los datos técnicos constructivos y de funcionamiento de cada equipo a incluir en la ruta de inspección. Con estos datos debe armar la información sensible por máquina y definir, junto al explotador y mantenedor, los parámetros (variables) de alerta y alarma que corresponden a cada punto de inspección.

El alcance del contrato debe, entonces, contemplar estas consideraciones.

10.5.2.3 Contrato por Objetivos

También conocidos como *contratos llave en mano*, se utilizan para obras o trabajos de mayor envergadura y consisten en contratar la ejecución de un trabajo completo con la provisión o no de materiales y herramientas necesarias para efectuarlo.

Más que en los anteriores, este tipo de contrato debe establecer claramente el alcance de los trabajos y a cuenta de quién estará la provisión de materiales y suministros como energía eléctrica, agua, vapor, gas, disposición final de residuos, provisión de andamios, escaleras, iluminación, servicios subcontrata-

dos, etc. Es importante establecer las responsabilidades de cada parte, así como la forma de medir el avance y la calidad del servicio.

Los contratos por objetivos (o monto global) son más sanos para la salud de la empresa en términos generales porque generan los menores compromisos. Gran parte de responsabilidad cae sobre la contratista: dirección, supervisión y control del personal, provisión de herramientas y materiales, costos adicionales o emergentes, gastos por traslados, administración de las subcontrataciones, etc. No obstante, siempre habrá alguna responsabilidad compartida entra las partes.

Un contrato de estas características debe estar constituido por las siguientes partes:

√ Objetivo
√ Condiciones generales
√ Alcance
√ Cláusulas legales y contractuales
√ Descripción de los trabajos y etapas de implementación
√ Especificación y documentación técnica
√ Instrumentos de evaluación y medición o indicadores de seguimiento.
√ Documentos adicionales de interés

Independientemente de la forma de contratación, hoy las empresas miden la fuerza de trabajo total. Este indicador se denomina FTE (full total equivalent) y su cálculo permite establecer la cantidad y eficiencia de la mano de obra total utilizada por el área de mantenimiento. Ver Sección 12.3 "Desarrollo de Indicadores", Capítulo 12.

10.5.3 Criterios de éxito para la Tercerización de Servicios

Las siguientes son algunas consideraciones válidas para iniciar un proceso de tercerización.

√ **Calificar a los Contratistas**. Junto al área de Compras, Mantenimiento debe establecer una metodología para seleccionar y clasificar empresas prestadoras de servicios. El proceso debe consolidar la información de desempeño de cada prestador y constituir un ranking objetivo para las distintas especialidades o rubros. Son de utilidad las auditorias en los talleres y oficinas de las contratistas.

√ **Alentar la diversidad de oferentes**. La escasez de ofertas hace cautiva a la empresa contratante de los pocos oferentes e impide la competencia. Genera contratos extensos en los que el contratista ingresa en una zona de comodidad difícil de salir. Se establece un acostumbramiento y una falta de competitividad tecnológica. La falta de competencia hace que la contratada reduzca su calidad de servicio y sus prestaciones en general.

√ **Celebrar un contrato justo**. El contrato firmado deberá satisfacer a ambas partes. Los contratos que benefician en mayor medida a alguna de las empresas, tarde o temprano se rompen. Además, el contrato deberá dejar abierta la posibilidad de ser revisado por iniciativa de cualquiera de las partes y por distintos motivos (dentro de lo razonable).

√ **No considerar el costo como única variable de decisión**. Es preciso evitar que sea el precio ofertado la única variable de decisión en la compulsa al momento de adjudicar el servicio. Un precio menor puede significar un costo total mayor.

√ **Considerar al Contratista como parte de la organización**. Si bien no es aconsejable que la empresa contratista utilice los mismos canales de gestión que la contratante, es necesario que desarrolle las actividades bajo los mismos estándares de seguridad y calidad. Nunca debe considerarse al contratista como una competencia para la empresa, sino como un aliado estratégico del negocio.

√ **Colaborar con el Contratista**. La empresa contratante debe trabajar coordinadamente y colaborar con la contratista para obtener su máximo rendimiento (ver sección anterior).

10.5.4 Causas de incumplimiento de contratos

Se muestra a continuación un resumen indicativo de las razones más frecuentes por las que un contrato de mantenimiento puede estar en peligro de rescindirse.

√ **Falta de presupuesto**. Los servicios contratados deben estar presupuestados. La falta de presupuesto (principalmente anual) imposibilita afrontar los pagos correspondientes y pone en riesgo la continuidad de los trabajos. Si los gastos ocasionados por los contratos no están respaldados por el presupuesto, el proveedor puede ver afectada la cadena de pagos y cancelar los servicios prestados.

√ **Falta de supervisión**. Los responsables de la contratista (Mantenimiento) deben destinar personas y recursos suficientes para supervisar los trabajos. La falta de supervisión atenta contra el cumplimiento de objetivos. La responsabilidad suele ser compartida por el contratante y el contratista.

√ **Falta de objetivos y reglas claras**. Según se mencionó con anterioridad, los contratos cuyos objetivos o metas no quedan adecuadamente establecidos, tienen gran posibilidad de fracasar. También cuando hay una pobre especificación de los trabajos. Esto incluye la falta de previsión al momento de cotizar; tanto la contratista como la contratante deben coincidir exactamente en el alcance de cada tarea. Las reglas que regirán el accionar de ambas partes deben establecerse en el contrato.

√ **Falta de idoneidad**. Si la contratista no cuenta con personal competente para las tareas previstas, la contratante puede verse en la necesidad de rescindir el contrato.

Resumen de aplicación

10.1 Introducción

- *En los últimos años hubo una evolución trascendental en la filosofía de gestionar fallas. Los logros en materia de confiabilidad, productividad, calidad y seguridad, tienen mucho que ver con el cambio cultural de las sociedades y la importancia que éstas dan al comportamiento humano.*

- *El compromiso, la dedicación y la voluntad se valoran más que el conocimiento.*

- *El factor humano en la gestión de activos tiene máxima importancia.*

10.2 Factores Estructurales

- *Los organigramas reales, aunque muchos lo nieguen, se construyen un poco en función de lo que la empresa desea y, otro poco, en función de lo que son capaces de ofrecer sus integrantes.*

- *Mantenimiento debe adaptar su proceso al proceso de la Compañía.*

- *La estructura funcional de Mantenimiento (organigrama) debe interactuar con el resto de la organización y encontrar la máxima eficiencia interna.*

10.2.1 Dotación

- *El número de personas afectadas al mantenimiento es una cuestión de equilibrio.*

- *Las personas no son máquinas a las que se les puede medir el rendimiento operativo. Y si se consideran como tales, estamos ante un serio problema de gestión.*

- *La dotación total del departamento de Mantenimiento, y su distribución en la jornada de trabajo, deberán responder a la carga de mantenimiento pro-activo y reactivo simultáneamente.*

- *El régimen de guardia en Planta consiste en destinar una parte de la dotación permanente a realizar rotación horaria y cubrir toda la jornada (24 horas).*

- *La guardia pasiva es una opción cuando la cantidad de acciones reactivas fuera del horario central no es alta, por ejemplo, cuando la Planta tiene un alto nivel de redundancias.*

- *Todo método de atención de acciones reactivas puede optimizarse si se implementan sistemas de gestión participativos como el TPM o el Mantenimiento de Primera Línea (FLM - First Line Maintenance).*

- *Mantener personal de Mantenimiento fuera del horario central, aunque sólo sea para tareas de emergencia, no es económico. Por tanto, si se decide que parte del plantel haga turnos rotativos, hay que estimar el costo de indisponibilidad de los equipos y compararlo con el costo fijo anual de mantener dichos turnos.*

10.2.2 Competencias

- *El desafío de un líder es armar un esquema de trabajo que funcione con los talentos disponibles capacitando a cada integrante del grupo de acuerdo a sus debilidades. Debe potenciar las fortalezas de cada colaborador y constituir un equipo de hombres comprometidos con sus tareas y con el bienestar general.*

- *Los proyectos de formación y capacitación se implementan con la colaboración del área de Recursos Humanos.*

10.2.3 Motivación

- *El mantenedor debe ser reconocido por lo que hace, valorado y escuchado. Debe sentirse orgulloso de su aporte. Sus opiniones y sugerencias deben ser tenidas en cuenta, dándole una respuesta en cada caso.*

10.2.4 Desempeño

- *El trabajador debe sentir que el entorno de trabajo es un marco de contención para él y sus dificultades.*

- *Cuando la persona no rinde lo suficiente en su trabajo, más tarde o más temprano quedará en evidencia. El superior inmediato debe tomar el problema y estudiar, junto al colaborador, las razones que lo llevan a esa situación y ayudarle en todo lo posible.*

10.2.5 Estructura Orgánica

- *Los factores que más influyen en el tipo de estructura son:*

  - *Tipo de proceso productivo (continuo, bach, por lotes, por proceso, etc.).*
  - *Tamaño de la Planta y distribución física de los activos.*
  - *Situación económica y financiera de la compañía. Situación política de la región.*
  - *Tipo de demanda de los productos que se comercializan.*
  - *Clase de producto fabricado o servicio prestado.*
  - *Oferta de mano de obra en la zona de influencia (calidad - precio - cantidad).*
  - *Situación del mercado de los servicios de terceros.*

- *Puede haber situaciones (por conveniencia técnica o productiva) que el líder de Mantenimiento responda directamente al área de Ingeniería y Proyectos, o al departamento de Producción.*

- *Antes de planear una optimización del departamento de Mantenimiento debe evaluarse de forma precisa el alcance total de las funciones desarrolladas. En muchas empresas se diseña la estructura en función de las acciones de mantenimiento "puro" y en verdad se hacen trabajos de mejora, modificaciones y proyectos de nuevas instalaciones. En rigor, esta clase de trabajos no corresponden al personal o plantel propio de Mantenimiento en lo que a dotación se refiere.*

- *Independientemente de la posición que Mantenimiento tenga en la estructura de la compañía, sus funciones pueden estar centralizadas, descentralizadas o ser una combinación de ambas.*

- *Una estructura con centralización funcional permite disponer de todos los recursos existentes en el área y direccionarlos según la necesidad circunstancial. Facilita la planificación, la priorización y la estandarización de tareas.*

- *Un exceso de centralización puede hacer más lenta la repuesta a pedidos y demorar el traslado de herramientas, materiales y repuestos.*

- *Las áreas descentralizadas se piensan con la finalidad de acercar el mantenimiento al sector productivo. Por este motivo, habitualmente la función del mantenimiento depende de una zona especial llamada Operaciones.*

- *Los esquemas mixtos centralizan ciertas funciones específicas y de gestión, y descentralizan las operativas. Se centralizan los trabajos de Taller, Oficina Técnica, Ingeniería de Mantenimiento y Almacén de Repuestos, y se descentralizan las acciones directas de la línea o del proceso.*

- *Hay nuevos modelos de organización que desafían los esquemas tradicionales y proponen alternativas más dinámicas y participativas como son las estructuras de gestión basadas en equipos de trabajo. Conocidas como estructuras TBE (Trabajo Basado en Equipos) buscan obtener de cada colaborador su máximo potencial y creatividad. Facilitan la utilización plena de la capacidad de cada persona y la transmisión de información haciéndola más transversal, rápida y eficiente. Promueven la formación y el crecimiento personal. Los colaboradores adquieren más autonomía y asumen la responsabilidad de organizar y distribuir su propio trabajo, evaluar su desempeño, identificar y resolver problemas y adaptarse a las condiciones cambiantes de la organización.*

10.3 Funciones y Responsabilidades

- *Las funciones son el conjunto de tareas y actividades que realiza el ocupante de un puesto o posición del organigrama para cumplir con los objetivos propuestos.*

- *Hoy se prefieren las funciones a los puestos, la capacidad y el conocimiento a la antigüedad, los Líderes a los Jefes. El Jefe ya no es el que más sabe de las cuestiones técnicas de la "cosa" de fábrica; sino aquel que, teniendo buenos conocimientos técnicos, puede abstraerse de los problemas cotidianos, sobreponerse y plantear soluciones estratégicas eficaces para lograr una gestión integral de mantenimiento. Es quien traza la política del sector, quien marca el rumbo del proceso, quien acompaña a los talentos humanos en su desarrollo personal, quien hace hacer, quien comparte el éxito desinteresadamente con su grupo y quien asume la responsabilidad en la adversidad.*

10.3.1 Posiciones de Mantenimiento

- ***Gerente de Mantenimiento**. Tiene la responsabilidad de elaborar la política global que marcará el accionar de los colaboradores y la utilización de los recursos para alcanzar la disponibilidad comprometida de los activos bajo su alcance.*

- ***Jefe de Ingeniería de Mantenimiento**. Es el responsable directo de diseñar e implementar la estrategia de mantenimiento más eficaz y eficiente para cada activo. Propone o lidera el análisis de alternativas técnicas para cumplir con los índices de disponibilidad, gasto, seguridad, rendimiento, calidad, etc. Su sector – corazón de la gestión de activos – es el ámbito donde se analizan las oportunidades de mejora y se diseña el plan de mantenimiento más efectivo para cada activo.*

- ***Jefe de Mantenimiento**. Es la persona encargada de coordinar las acciones de Mantenimiento diseñadas por Ingeniería de Mantenimiento y responder a la demanda de las reparaciones correctivas con seguridad, calidad y celeridad. Es quien define el criterio para distribuir la fuerza laboral (mano de obra directa) de todo el sector.*

- ***Analista de Mantenimiento**. Es quien estudia la disponibilidad de las máquinas y reporta los resultados. Es el apoyo técnico-administrativo para los Ingenieros de Mantenimiento y para los grupos de RCM (es la mano derecha del facilitador).*

- ***Supervisor**. Es el referente técnico directo de los especialistas y operarios. Está en contacto permanente con las personas que realizan físicamente el trabajo. Define la fuerza laboral necesaria para cada tarea según los lineamientos marcados por el Jefe de Mantenimiento. Sus principales funciones son verificar la calidad de los trabajos, evaluar la idoneidad de los miembros de su equipo, asegurar los repuestos, insumos y herramientas necesarias para cada tarea, solicitar los permisos de trabajo y comunicar la finalización de los mismos.*

- ***Soporte de Gestión***. *Centraliza, procesa y distribuye la información de gestión (reportes, indicadores, informes, etc.). Prepara información para el Líder de Equipo y/o Área usada en reuniones de Gerencia u otros eventos. Consolida la información para confeccionar el presupuesto de mantenimiento, evaluar los gastos de terceros, analizar horas extras, calcular el consumos de repuestos y materiales, etc.*

- ***Soporte de Tecnología y Calidad***. *En estructuras transversales, es la persona encargada de los temas tecnológicos relacionados con la Calidad. Verifica en campo que los procedimientos de mantenimiento respondan a los estándares de calidad y seguridad vigentes.*

- ***Planificador***. *El Planificador colabora en la coordinación y planificación de la carga de trabajo según las prioridades y capacidades del sector. Es la persona que regula la carga de trabajo en función de la capacidad ejecutiva del área. Planifica rutinas de mantenimiento preventivo y acciones reactivas, y asegura la disponibilidad de repuestos y herramientas para cada trabajo.*

- ***Técnicos, especialistas y operarios de Mantenimiento***. *El personal directamente afectado a la ejecución de los trabajos se compone de técnicos, especialistas, idóneos y operarios. Deben ser competentes, expeditivos, hábiles y estar comprometidos con el funcionamiento de los equipos que atienden. Son los ojos de Mantenimiento frente a la máquina. Deben mantener la prolijidad y el orden, y ser pulcros en sus tareas para garantizar la seguridad y la calidad.*

10.3.2 Comentarios sobre el Liderazgo

- *El líder es una persona que logra coordinar con éxito los talentos de su grupo, es quien consigue el respeto de sus seguidores a través del ejemplo, estimula la cooperación entre los miembros de su equipo y respeta los compromisos asumidos. Un líder respeta a sus pares y reconoce el talento de sus colaboradores, atendiendo sus ideas y sugerencias. El líder de un equipo de trabajo respeta y considera la forma de pensar de cada integrante, confía en ellos y fomenta el pensamiento crítico constructivo librándolos del temor a ser mal interpretados.*

10.3.3 Comentarios sobre el Span of Control

- *El Span of Control (SOC) es la cantidad de colaboradores directos que reportan a un superior (Jefe, Gerente o Director). Indica indirectamente la cantidad de posiciones directivas por nivel que tiene la organización. A mayor cantidad de puestos, cada uno controla y lidera menos gente (menor SOC) y la estructura es más angosta y vertical.*

10.4 Crecimiento de Talentos

- *La competencia adquirida por un colaborador de mantenimiento es importante para no cometer errores y puede medirse en función del grado de habilidad que tiene para desempeñarse con seguridad y calidad en su trabajo.*

10.4.1 Capacitación

- *Las máquinas e instalaciones son cada vez más sofisticadas y complejas, lo que demanda un sólido conocimiento técnico de los que la atienden. La capacitación permanente en el área de mantenimiento es casi obligatoria.*

10.4.2 Desarrollo

- *La organización se beneficia si cuenta con índices elevados de desarrollo, pero para eso debe promover la motivación. No hay desarrollo posible sin motivación. Dotar al personal de mantenimiento de aptitudes polivalentes, es parte de su desarrollo.*

- *El proceso hacia la polifuncionalidad se inicia negociando con los representantes gremiales las condiciones del nuevo proyecto. Tal vez sea necesario revisar las categorías, los incentivos y el régimen de promoción de los empleados. Acordado el aspecto político-económico, se seleccionan las tareas a polifuncionalizar según cada especialidad, se prepara el esquema de transferencias y se eligen las personas más idóneas para asegurar el éxito del programa. Luego, se comunica y lanza una prueba piloto – habitualmente de mediano plazo – y se observan los resultados. Se realizan las correcciones convenientes y se replica la experiencia en otras áreas o conjunto de tareas.*

10.4.3 Evaluación

- *Lo primero, aunque no lo único, de las evaluaciones de desempeño es identificar las fortalezas y debilidades de los empleados.*

- *Una evaluación de desempeño no es un examen ni una búsqueda de errores; es el ámbito donde colaborador y líder (a solas) intercambian ideas, manifiestan sus inquietudes y plantean sus necesidades. La evaluación de desempeño no mide la habilidad del colaborador con respecto a otro u otros colaboradores; es la medición contra sí mismo. Es evaluar los progresos y los logros de la propia persona.*

10.5 Tercerización del Mantenimiento

10.5.1 Razones de la Tercerización

- *Equipos de gran complejidad, que requieren asistencia de personal altamente capacitado.*

- *Equipos en período de garantía.*

- *Carga instantánea de trabajo elevada.*

- *Reducción de gastos fijos.*

- *Eventos de gran envergadura como las Paradas de Planta.*

10.5.2 Contratos para Servicios de Mantenimiento

- *La empresa tomadora del servicio debe establecer con total claridad la finalidad del mismo, qué tareas se contratarán, qué se espera del prestador, las especificaciones técnicas que regirán el contrato, el alcance preciso de cada trabajo, las condiciones legales que lo regularán, las cláusulas de rescisión, los impuestos y punitorios si los hay, la forma de medir el avance, terminación y calidad de los trabajos, el plazo de ejecución, la responsabilidad de cada una de las partes, la forma de pago o cancelación de compromisos, la provisión de herramientas, materiales y repuestos, las normas de seguridad vigentes, etc.*

- *Los contratos de Horas - Hombre por Administración consisten en acordar, a través de un contrato por tiempo determinado, el precio unitario de la hora-hombre por especialidad y categoría.*

- *En los contratos por Unidad de Trabajo se conviene un importe unitario por unidad de trabajo mensurable. Se usan medidas como el metro cuadrado, el metro lineal o, directamente, cantidad de equipos inspeccionados, puntos lubricados, piezas montadas o desmontadas, etc.*

- *Los contratos por Objetivos se utilizan para obras o trabajos de mayor envergadura y consisten en contratar la ejecución de un trabajo completo. Se compone de las siguientes partes:*

- *Objetivo*
- *Condiciones generales*
- *Alcance*
- *Cláusulas legales y contractuales*
- *Descripción de los trabajos y etapas de implementación*
- *Especificación y documentación técnica*
- *Instrumentos de evaluación y medición o indicadores de seguimiento.*
- *Documentos adicionales de interés*

10.5.3 Criterios de éxito para la Tercerización de Servicios

- *Calificar a los Contratistas.*
- *Alentar la diversidad de oferentes.*
- *Celebrar un contrato justo.*
- *No considerar el costo como única variable de decisión.*
- *Considerar al Contratista como parte de la organización.*
- *Colaborar con el Contratista.*

10.5.4 Causas de incumplimiento de contratos

- *Falta de presupuesto.*
- *Falta de supervisión.*
- *Falta de objetivos y reglas claras.*
- *Falta de idoneidad.*

Capítulo 11

Costos de Mantenimiento

Lo que distingue al hombre de los otros animales son las preocupaciones financieras[1].

---

1 Jules Renard (1864 - 1910) escritor y dramaturgo francés.

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Conocer las distintas clases de gastos y su influencia en la gestión de activos.
- √ Entender la necesidad de controlar el gasto integral de mantenimiento.
- √ Estimar el costo de ciclo de vida de los activos.
- √ Evaluar la factibilidad económica en la renovación de equipos.
- √ Conocer los distintos modelos presupuestarios.
- √ Participar en la aplicación de mecanismos de control del gasto de mantenimiento.

Índice de Contenidos

11.1 Introducción

11.2 Tipos de Gastos (Visión Tradicional)
- Gastos de Mano de Obra
- Gastos de Materiales
- Gastos de Terceros
- Gastos Financieros
- Gastos por Fallos
- Gastos Fijos
- Gastos Variables

11.3 Gasto Integral de Mantenimiento
- Visión de la Contabilidad del Valor

11.4 Ciclo de Vida de los Activos
- Renovación de activos y estrategias de Mantenimiento

11.5 Presupuesto de Mantenimiento
- Criterios de Presupuestación
- Control Presupuestario

11.6 Indicadores de Gestión de Costos de Mantenimiento

Resumen de aplicación

Anexos Relacionados
- Anexo IX: Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Cost)

11.1 Introducción

Los gastos de mantenimiento han adquirido gran protagonismo en la gestión de activos. El área de mantenimiento debe asegurar que las funciones de los equipos se cumplan en un marco de conveniencia técnico - económica. En el pasado, los gastos de mantenimiento no representaban un gran porcentaje del total de los gastos de operación, por lo que podían erogarse recursos en incrementar disponibilidades innecesarias. Tampoco se prestaba demasiada atención a las consecuencias de los fallos; el diseño holgado de los sistemas productivos permitía cierta cuota de ellos. Sin embargo, la automatización y el incremento de la complejidad e intensidad de los sistemas productivos, han obligado a reconsiderar la situación. En la actualidad, el costo de un producto o servicio está seriamente influenciado por el gasto de mantenimiento. Incluso, en algunos casos, hasta puede superar el gasto operativo de producción. Por lo tanto, uno de los objetivos principales de Mantenimiento es encontrar la dosis justa de acciones de mantenimiento con menor gasto total e integral. El simple recorte puntual o aislado de un gasto no asegura, de ninguna forma, la reducción del costo integral de mantenimiento. Obsérvese que las técnicas de mantenimiento abordadas en los capítulos anteriores son claras en este sentido. Todas las estrategias de mantenimiento seleccionadas con sensatez deben estar orientadas a satisfacer la disponibilidad en la medida de lo necesario, y no más. Es por ello que, por ejemplo, el RCM en su diagrama de decisión escoge las estrategias para cada activo evaluando el costo de cada modo de falla[1].

Tratar de evitar todos los modos de falla de un equipo olvidando analizar sus consecuencias (económicas, laborales o ambientales), además de ser seguramente inviable tecnológicamente, puede ser inútil económicamente. La pérdida de utilidad por **falta** o **exceso** de mantenimiento, está implícito en las ecuaciones de conveniencia económica de cada una de las estrategias ya analizadas.

El gasto de evitar fallas y el gasto de repararlas (mano de obra, materiales y servicios), más el gasto indirecto de llevar adelante la administración de las estrategias de mantenimiento, forman parte de los gastos operativos (GO) de una empresa. A su vez, éstos contribuyen al precio final del producto o servicio. Téngase en cuenta que la finalidad de las empresas con fines de lucro es ganar dinero a través de las ventas sostenidamente.

Figura 11.1.1
Gastos de Operación en el "Sistema Empresa" en los que están incluidos los gastos de Mantenimiento.

Por lo general, los costos de mantenimiento - en cuanto a su relación global - suelen medirse en función del monto invertido en activos. Esta magnitud permite evaluar la relación entre una parte del capital de trabajo y los gastos que requiere su mantenimiento. Pero tal relación no tiene más utilidad que la de hacer análisis contables, y casi nunca es útil para tomar decisiones de importancia.

No es del todo acertado suponer que el gasto de mantenimiento lo fija la empresa, aunque sea cierto que ésta puede aumentarlo o reducirlo drásticamente a su voluntad. Sin embargo, también es cierto que las empresas pueden optar por adquirir del mercado materias primas de mejor o peor calidad para elaborar sus productos. ¿Por qué una empresa podría inclinarse a comprar materias primas de mejor calidad, aún a un precio mayor? Tal vez porque una mayor calidad de materias primas permita lograr productos finales de mejor calidad. En Mantenimiento ocurre algo similar. Recortar indiscriminadamente gastos de mantenimiento puede repercutir en la calidad de los productos elaborados y, lo que es peor, en los niveles de seguridad que se pretendan alcanzar.

Es por ello que el gasto de mantenimiento lo fija el negocio a través del contexto operativo; y la empresa lo presupuesta. El gasto total de mantenimiento de una Planta es la suma de los gastos **necesarios** para que cada activo **cumpla las funciones previstas** en el **contexto operativo óptimo** para el **negocio** en ese momento.

---

1 Siempre que las consecuencias del fallo no afecten la seguridad de las personas o el medio ambiente.

En general, el pedido de las gerencias de Planta es reducir a la mínima expresión los gastos de mantenimiento. Cualquiera podría decir, con razón, que dicha medida tarde o temprano dejaría de ser beneficiosa pues se verían afectadas la confiabilidad y la disponibilidad. Si la reducción de los gastos llega al punto en que se eliminan tareas necesarias para garantizar las funciones de esos activos, dicho punto de inflexión sería el quiebre a partir del cual la reducción ya no convendría. Pero, la pregunta es, ¿cuál es el límite o punto de inflexión? y, ¿cómo y quién lo determina?

Muchos departamentos de mantenimiento desconocen porqué hacen lo que hacen; saben técnicamente qué hacer, pero no por qué. Vale decir, no evalúan los modos de falla y, por ende, no proponen las estrategias más convenientes para cada equipo desde un punto de vista sistémico. La tarea más ventajosa no es la más atrayente técnicamente; sino la que brinda los mejores resultados para el negocio en su conjunto.

Los departamentos de mantenimiento, por lo general, no están en condiciones de responder cuál es el límite de reducción para los gastos de mantenimiento porque sencillamente no lo han analizado. No saben hacerlo o no se dan el tiempo para hacerlo porque están ocupados reparando máquinas. Esta situación es aprovechada (inconscientemente) para pedir regulares y permanentes reducciones. Mientras Mantenimiento responda achicando gastos sin poder explicar cuáles serán las consecuencias a corto, mediano y largo plazo, la situación no cambiará jamás. Aún más, cuando la disponibilidad se vea afectada, será Mantenimiento el responsable de no haberla garantizado.

El monto anual del gasto en mantenimiento para obtener de un activo el rendimiento que se necesita, es **único**; lo que no significa que sea sencillo de calcular. En este sentido, quedan pocas dudas si nos remitimos a la sección 7.2 "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad" Capítulo 7. Junto a otras, es la herramienta más adecuada para establecer el gasto integral de mantenimiento más equilibrado. Además, sabremos en qué podemos reducir gastos y en qué no. Si el plan de mantenimiento propuesto para cada activo es deliberado y no estudiado analíticamente, no se sabrá el impacto de las reducciones; *sería como caminar a tientas en una sala llena de obstáculos.*

Debemos decir por último que sería osado arriesgar valores porcentuales y orientativos sobre gastos de mantenimiento para diferentes actividades industriales. Si bien las comparaciones pueden resultar útiles para situaciones particulares, cada empresa debe evaluar si sus recursos los dispone donde más beneficio le proporcionan.

11.2 Tipos de Gastos (Visión Tradicional)

Tradicionalmente los gastos de mantenimiento se agrupan de acuerdo a dos criterios; por **tipo de gasto** y por la relación con el **volumen de actividad**. La primera categorización contempla los siguientes rubros:

√ Mano de obra (dotación estable)
√ Materiales (repuestos, insumos, consumibles, etc.)
√ Terceros (servicios especializados, mano de obra contratada, consultoría, etc.)
√ Financieros (mantenimiento de inventarios, amortización de equipamiento, etc.)
√ Consecuencia de los fallos (volumen, facturación, averías, daños a terceros, etc.)

El segundo criterio divide a los gastos de la siguiente forma:

√ Fijos
√ Variables

11.2.1 Gastos de Mano de Obra

La mano de obra puede representar el mayor gasto en mantenimiento. La dotación permanente dedicada a tareas técnicas y administrativas es un gasto fijo. Los gastos directos de mano de obra para acciones pro-activas y reactivas de todo el parque de máquinas, surgen de planificar la demanda de dichas acciones en función del plan de mantenimiento de cada activo. Sólo así, puede establecerse con certeza el volumen total de gastos por este concepto. Las tareas administrativas de gestión (indirectas) también demandan mano de obra que debe incluirse en el gasto.

Es muy importante incluir los gastos indirectos o variables de la mano de obra solicitada a empresas prestadoras de servicios, aunque el contrato no sea por administración. En muchos casos se solicita al proveedor que discrimine el valor total de la facturación en los rubros *materiales* y *mano de obra*. Con el importe proporcional por mano de obra, informado por el proveedor, se calculan las horas hombre (a valor promedio) que representa dicho importe facturado. La dotación propia (gasto fijo) más el número de personas equivalente a las horas hombre (gasto variable), representan las FTE (full total equivalent) o número total de personas que han sido necesarias para hacer frente a todas las tareas de mantenimiento en determinado período. Para los casos en que se contrata fuerza laboral por administración, la evaluación de la dotación verdadera total de mantenimiento (FTE) es más sencilla.

El valor horario utilizado para calcular el costo de mano de obra es superior a la remuneración percibida por el trabajador porque incluye los costos indirectos prorrateados por el sector de Recursos Humanos como cargas sociales, vacaciones, beneficios, seguros, capacitación, etc.

11.2.2 Gastos de Materiales

Los repuestos, insumos y materiales también constituyen un buen porcentaje del total de los gastos operativos de mantenimiento. Los gastos de materiales se generan por los repuestos retirados del Almacén y consumidos en las tareas reactivas y pro-activas, y por las compras de materiales de cualquier índole con el mismo fin. Mantenimiento puede estimar estos gastos contabilizando el total de vales emitidos contra las Órdenes de Trabajo al valor correspondiente de cada ítem. También, sumando las Órdenes de Compra relacionadas con materiales usados por mantenimiento.

De igual forma que para los gastos de mano de obra, los proveedores de servicios pueden discriminar qué proporción de su facturación corresponde a materiales. Luego, se imputa el monto a la cuenta contable correspondiente lo que permitirá saber el gasto total en materiales.

Tómese, por ejemplo, el caso de un taller de mecanizado al que se le solicita fabricar con cierta regularidad piezas especiales. El taller necesitará materias primas para fabricar las piezas y dispondrá personal idóneo para confeccionarlas. Por cada factura, el proveedor podría discriminar el importe proporcional de materiales y mano de obra. Así, el sistema contable de la empresa – a través de las OT's del SIM – puede registrar ambos gastos.

11.2.3 Gastos de Terceros

La tercerización tiende a reducir los gastos fijos, permitiendo erogar recursos económicos sólo en el momento preciso. Generalmente se dejan para la contratación aquellas tareas variables dependientes de la demanda de trabajo. El nivel de gastos en terceros o servicios contratados (outsourcing) depende de muchos factores, pero sobre todo de la situación geopolítica de la zona de operación y de la política corporativa de la compañía. No existe una verdad absoluta en este sentido, cada empresa debe disponer de los servicios de terceros en la medida de su conveniencia.

El control de gastos de terceros puede hacerse desde el sistema contable y desde el SIM, siempre que la facturación de los prestadores sea imputada a las OT's correspondientes de cada trabajo. Toda la información volcada a los sistemas corporativos (contable o de gestión de mantenimiento) también es válida para fines presupuestarios.

11.2.4 Gastos Financieros

Forman parte de este rubro el gasto financiero por mantener el stock inmovilizado de repuestos y el costo de amortización de equipos o instrumental sofisticado para tareas de complejidad técnica. Incluso, hay empresas que incluyen los costos de amortización de los equipos back-up o stand-by. Esto permite ver que si una función de Planta requiere una redundancia para alcanzar un nivel de disponibilidad, es Mantenimiento quien debe afrontar las consecuencias del costo adicional. Posiblemente sea refutable este criterio, pero vale la pena ponerlo en el tapete de la discusión.

Analizándolo por el absurdo uno podría preguntarse qué ocurriría si para subsanar una inadecuada gestión de mantenimiento y satisfacer las necesidades productivas, se duplicaran todos los activos de la Planta. En tal caso queda claro que sería el departamento de Mantenimiento el responsable de los costos de amortización de los equipos adicionales.

En el Capítulo 9 se abordó el problema de la gestión de stock cuya optimización es vital para reducir el capital de trabajo inmovilizado. Si Mantenimiento es el encargado de administrar los inmovilizados no productivos (repuestos), entonces los gastos financieros que de su guarda deriven también caen bajo su responsabilidad.

11.2.5 Gastos por Fallos

Los gastos por fallos (también llamados gastos de *consecuencias* o *inducidos*) se refieren a la pérdida de beneficios que la empresa afronta por causas directa o indirectamente vinculadas con el accionar de mantenimiento; vale decir, los perjuicios derivados del mal funcionamiento de las máquinas. A veces este gasto no se considera, aún siendo importante. La ocurrencia de algunos modos de falla puede derivar en productos defectuosos, en detenciones de equipos que afectan las ventas, en desechos, desperdicios, re-procesos, en mayores gastos por garantías, en reparaciones adicionales pos-venta, en devoluciones, pérdidas de mercados, clientes o imagen (difíciles de cuantificar), etc. Los gastos provocados por tales fallos normalmente se relacionan con problemas de indisponibilidad y calidad, aunque en ocasiones pueden atentar contra la seguridad o la protección del medio ambiente.

Dice Jean Paul Souris[1]: *"el costo de no mantener es el costo que resulta del no mantenimiento de las características funcionales de los equipos".*

Tanto los gastos financieros como los gastos por fallos pocas veces se tienen en cuenta a la hora de cuantificar el gasto total de mantenimiento. Una posible causa es la mayor dificultad que reviste su estimación. Sin embargo, una administración realista de los gastos operativos impone que sean considerados; es la manera de trabajar con gastos integrales.

El principal motivo por el que gran parte de los departamentos de Mantenimiento están liderados por expertos reparadores y no, también, por expertos mantenedores, es que en los gastos del área no se incluyen los rubros mencionados. Si Mantenimiento no es responsable por los gastos ocasionados a consecuencia de una estrategia ineficaz para los activos, nunca se esforzará en reducir dichas consecuencias. También es la causa por la que habitualmente se tiende primero al rediseño para lograr

---

1 Ver referencia bibliográfica.

confiabilidad y disponibilidad; los gastos por mejoras o modificaciones normalmente no se imputan a la cuenta de Mantenimiento sino a alguna cuenta de inversiones de la Planta. Esto hace que sea ligera la decisión de rediseñar los activos para mejorarles la confiabilidad aunque, a veces, lejos de mejorarla la empeoran.

Las pérdidas debidas a un mal mantenimiento se manifiestan como escapes de vapor, gas, aire comprimido, combustibles, etc. También como pérdidas de energía al fallar aislaciones térmicas, trampas de vapor, quemadores, válvulas, etc. o gastos a incurrir por disposición final de residuos, tratamiento de materiales peligrosos, chatarras, transporte de desechos, etc.

11.2.6 Gastos Fijos

Una visión trasversal de los gastos, es dividirlos en fijos y variables. Los gastos fijos son las erogaciones de dinero en las que incurre la empresa independiente del volumen de actividad.

La mano de obra del personal permanente operativo y administrativo es un gasto fijo que no depende del número de intervenciones pro-activas o reactivas (una vez establecida la dotación óptima). Es un gasto fácil de presupuestar. Son ejemplos de gastos fijos los derivados de:

√ La remuneración del personal estable de mantenimiento.
√ Los gastos administrativos del área técnica (gestión / documentación).
√ Los repuestos utilizados en tareas pro-activas (preventivo, predictivo, detectivo, etc.) cuya frecuencia es calendaria.
√ Los servicios contratados periódicamente (análisis de vibraciones, termografía, etc.).
√ El consumo de lubricantes en rutinas pro-activas calendarias.
√ El programa anual de capacitación para el personal de mantenimiento.
√ Las amortizaciones de los equipos de inspección y diagnóstico.
√ El costo financiero anual de los repuestos inmovilizados.

Vale destacar que el diseño de los equipos influye en los gastos fijos de mantenimiento; a mayor mantenibilidad (mejor diseño) menores serán los gastos necesarios para sostener sus funciones.

11.2.7 Gastos Variables

Por su parte, los gastos variables son todos los que guardan cierta relación con el volumen de actividad de Mantenimiento o con el régimen de funcionamiento de los equipos.

Las intervenciones correctivas para solucionar fallos imprevistos que requieran la realización de horas extras, son gastos variables. De la misma forma que las consecuencias económicas que éstos provocan. También son variables los gastos de mano de obra en horas extras y los repuestos de las acciones pro-activas cuyas frecuencias de ejecución dependan del régimen de marcha de los equipos o del volumen de producción.

Los gastos de materiales u horas extras por acciones restaurativas (ver Capítulo 6) surgidas de otros mantenimientos pro-activos (predictivo o detectivo) se consideran gastos variables.

11.3 Gasto Integral de Mantenimiento

Las empresas que buscan resultados favorables a mediano y largo plazo basan la gestión de sus activos en el **gasto integral** de mantenimiento; es decir, consideran los cinco factores simultáneamente: mano de obra, materiales, terceros, financieros e inducidos (por fallos).

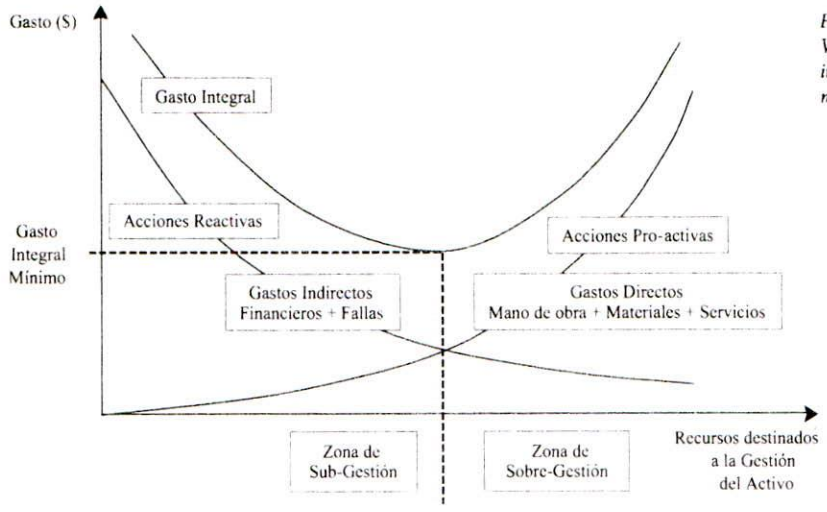


Figura 11.3.1 Variación del gasto integral de mantenimiento.

La figura 11.3.1 muestra que a mayor esfuerzo pro-activo, mayores son los costos que generan los gastos por llevar a cabo dicho esfuerzo. Lo contrario ocurre con las acciones reactivas. Puede esperarse un punto de equilibrio en el cual el gasto integral sea mínimo.

Sin embargo, el criterio es válido a nivel *modo de falla*, según lo analizado en las secciones anteriores a través de las ecuaciones de conveniencia económica para cada estrategia de mantenimiento y no para todo el activo de acuerdo a su criticidad. Recuérdese que la criticidad tiene validez sólo a nivel modo de falla y no a nivel activo; no puede hablarse de *criticidad de equipo* pues un modo de falla del equipo puede tener serias consecuencias para la seguridad o la producción y el resto no. Por tanto, si consideramos crítico al activo probablemente hagamos los mismos esfuerzos con todos sus modos de falla y nos ubiquemos a la derecha del punto de equilibrio (figura 11.3.1), dilapidando recursos innecesariamente.

Un ejemplo característico del gasto integral de mantenimiento lo representan los aceites de uso industrial. Un aceite apto para las condiciones de servicio, y que cumpla con las propiedades necesarias para el funcionamiento normal del equipo es, a largo plazo, más económico que un lubricante de menor precio y de propiedades físico-químicas inferiores. Un aceite de baja calidad o fuera de especificación produce desgaste acelerado en los mecanismos y un gasto global mucho mayor a largo plazo. El mismo criterio se aplica a infinidad de piezas, materiales y consumibles de uso común en mantenimiento.

Sin embargo, esto no significa que siempre a mayor precio mayor calidad; los responsables de mantenimiento deben conocer la calidad relativa de cada producto y su precio unitario para evaluar la relación precio – calidad a mediano y largo plazo. Además, debe quedar evidencia comprobable de que se hizo un análisis, y no decidir por la sola presunción de que cierto material es más conveniente que otro (muy común).

Una visión integral de los gastos de mantenimiento permite realizar análisis sistémicos de la influencia de las acciones de mantenimiento en el negocio. Analizar los gastos aisladamente no permite tal abordaje quitando realismo a cualquier análisis, tampoco permite tomar decisiones de importancia. El gasto integral de mantenimiento deja ver tanto los beneficios de la gestión de los activos como el perjuicio que la misma puede ocasionar.

Con respecto a la gestión integral de mantenimiento, Luis Navarro Elola[1] y sus coautores en página 47 del libro *Gestión integral de mantenimiento*, dicen: "*Se trata, por tanto, de gestionar de una manera activa basándose en los objetivos de la empresa y no sólo en los objetivos tradicionales de mantenimiento, disponibilidad y costes, admitiendo una postura pasiva*". Esta expresión sintetiza perfectamente nuestra visión en este sentido.

---

1 Ver referencia bibliográfica.

11.3.1 Visión de la Contabilidad del Valor

La contabilidad de costos, vinculada a la función Mantenimiento, tiene la desventaja de pensar en términos de productividad. Un síntoma característico de tal situación es que muchos Jefes y Gerentes tienen casi una obsesión por mantener ocupado al personal para aumentarles la productividad. Piensan que la organización seguramente se verá beneficiada si la gente está *siempre haciendo algo* aunque, para ello, sea necesario *crear trabajo*. Mantenimiento debe ejecutar las acciones justas para cada activo en el momento justo, y saber que cualquier tarea por demás puede ser contraproducente. En la medida que los trabajos escogidos para ocupar al personal no pongan en riesgo la confiabilidad o incrementen inútilmente los gastos, no hay problema. Sin embargo en muchos casos, dar trabajo innecesario trae más problemas que soluciones; todo trabajo realizado por Mantenimiento debe agregar valor[1].

En cierta oportunidad ocurrió que el Jefe de Mantenimiento de una empresa pidió desarmar y revisar - *por las dudas y para ocupar al personal del taller mecánico* - las bombas en stand-by de un sector de la Planta. La rutina de búsqueda de fallos ocultos (mantenimiento detectivo) para esos activos se había realizado la semana anterior con resultados favorables, y el plan de mantenimiento no sugería rutinas adicionales de ningún tipo. Para los trabajos se consumieron partes y repuestos, como rodamientos y otras piezas, cuyo gasto quedó fuera de presupuesto. Sin embargo, el daño mayor se produjo cuando una semana después de la invasión preventiva una de las bombas en stand-by debió entrar en productivo y no lo hizo porque un rodamiento mal montado partió el eje de accionamiento. Siendo que la bomba protegida había sufrido una falla, ocurrió un fallo simultáneo que interrumpió y afectó la función de bombeo de producto al silo principal, ocasionando un costo total por falla de $156.000 en un sólo día.

La contabilidad del valor pensaría en otros términos. Si Mantenimiento eventualmente posee personal ocioso y conoce cuales son los cuellos de botella del proceso, podría disponer técnicos de guardia para que, ubicados en cercanías de esas máquinas, las observen, analicen y aprendan de ellas. El objetivo es que, sin invadirlas, verifiquen si operan correctamente y puedan identificar situaciones de anormalidad aunque se diga que *no están haciendo nada más que observar un equipo pasivamente*. Debe entenderse que cualquier beneficio, por menor que sea, en los equipos cuellos de botella es más ventajoso que otra tarea que parezca, en principio, más *productiva*.

La productividad debe ser bien entendida. El personal que hace cosas innecesarias rompe, daña, ensucia, genera gastos, consume piezas, se expone al riesgo, etc. Es decir, activa todos los mecanismos de la organización innecesariamente. Es preferible dejar que el personal se prepare y capacite *pasivamente* para atender eventos realmente necesarios. Se presenta con frecuencia este tipo de situaciones en el personal de guardia que está a turnos rotativos. Cuando el personal no está atendiendo las emergencias de la Planta es saludable que realice recorridas de mantenimiento o rutinas de inspección dinámicas (RID); pero únicamente en los casos que Ingeniería de Mantenimiento valide su utilidad. Hay casos en que los Jefes de Mantenimiento están preocupados por la productividad de los técnicos y piden que se les asignen tareas de cualquier tipo; el lema es, *"siempre debe haber algo para que hagan"*.

El contexto operativo de la empresa (que incluye al mercado) es vital para definir la política de gastos de mantenimiento. Si la situación reinante es un mercado insatisfecho (se vende todo lo que se produce), el objetivo debe ser eliminar los cuellos de botella que impidan la fabricación de productos vendibles. Por tanto, Mantenimiento debe asegurar la disponibilidad requerida para las máquinas ubicadas en los cuellos de botella aunque se incremente el gasto en valores absolutos (el costo de mantenimiento incluso puede descender).

Si, contrariamente, el panorama muestra que el mercado está completamente satisfecho (capacidad productiva remanente), entonces el objetivo es reducir el gasto absoluto al punto de no perjudicar el estado de demanda vigente.

---

1 Al respecto, Enrique Nicolás Cartier en la Sección 11.4 pág. 1022 de su paper en www.intercostos.org/documentos, advierte: "... No sorprende entonces que, en el ámbito de los sistemas de información de las empresas, la generación de datos sobre el VALOR de los bienes y servicios, y su medición, haya pasado a ser una preocupación central para los profesionales responsables de su diseño"...

Los comentarios precedentes se refieren a dos paradigmas universales. El primero, es el costo de mantenimiento expresado en términos de $/volumen de actividad (el costo de mantenimiento depende del volumen de producción). Para un mercado insatisfecho probablemente el costo de mantenimiento disminuya, no por aumento de eficiencia interna del sector sino, simplemente, porque aumenta el denominador del cociente (mayor volumen de actividad). Además, no es cierto que todos los gastos de mantenimiento tengan relación directa con el régimen de marcha de los equipos.

El segundo es el gasto absoluto de mantenimiento que, en realidad, depende de la situación de la compañía. En algunas circunstancias puede ser mejor reducirlo mientras que en otras puede ser conveniente incrementarlo.

Suele asumirse que la responsabilidad de presupuestar y controlar gastos de mantenimiento es del área Mantenimiento. Sin embargo, la única manera de obtener resultados concretamente favorables, es trabajando en conjunto con el sector Contable. El departamento de Costos debe entender que Mantenimiento es uno de los sectores más influyentes en hacer que los gastos de operación, vinculados con la reparación y mantenimiento de los activos, sirvan para lograr el máximo beneficio para el negocio.

11.4 Ciclo de Vida de los Activos

Un aspecto importante a considerar, es el costo del ciclo de vida de las máquinas[1]. El LCC (del inglés Life Cycle Cost) tiene en cuenta el costo de adquisición por la instalación completa de un equipo, el gasto total de su operación y los costos derivados de su descarte u obsolescencia.

$$LCC = C_{AD} + F_{VA}(GO) + C_{OBS} \qquad 11.4.1$$

$$LCC = C_{AD} + F_{VA}(GE + GM) + (C_{DIS} - V_R) \qquad 11.4.2$$

El primer término (C_{AD}) de la ecuación 11.4.1 es el costo de la inversión para instalar el equipo (proyecto). Está constituido por el costo de anteproyecto, diseño, compra, construcción, entrega, instalación, capacitación para operar y mantener, etc. GO es el gasto de operación para toda la vida del sistema. Se compone del gasto operativo de explotación GE (mano de obra, energías, combustibles, amortizaciones, insumos, puesta en marcha, etc.) y del gasto total de mantenimiento por mano de obra G_{MO}, materiales G_{MAT}, servicios G_{SER}, gastos financieros G_{FI} y gastos de fallas G_{FA}. Ecuación 11.4.3.

$$LCC = C_{AD} + F_{VA}(GE + G_{MO} + G_{MAT} + G_{SER} + G_{FI} + G_{FA}) + (C_{DIS} - V_R) \qquad 11.4.3$$

El último término (C_{OBS}) se compone del costo estimado para la disposición final del activo (C_{DIS}) por descarte, retiro de chatarra, adecuación ambiental, etc. y del valor residual de venta (V_R) si lo tuviese. Por su parte, F_{VA} es el factor de valor actual para el activo y se calcula según la ecuación 11.4.4.

$$F_{VA} = \frac{(1 + r)^{N_U} - 1}{r\,(1 + r)^{N_U}} \qquad 11.4.4$$

Donde r es la tasa de interés fija y N_U el número de años considerados para el análisis.

Debe hallarse un equilibrio entre los costos de inversión o adquisición (C_{AD}) y los gastos de operación (GO). Una baja tasa de mantenibilidad – a raíz de un mal diseño – incrementa los gastos de operación durante todo el período de operación o explotación.

Si, por ejemplo, los repuestos de una nueva máquina tienen baja intercambiabilidad con existencias presentes en el stock, será necesario mantener en el Almacén nuevos grupos inmovilizados que aumentarán los gastos de inventario y el capital de trabajo. Tal vez, sean preferibles diseños que, aún más costosos al inicio, reduzcan los gastos de mantenimiento a mediano y largo plazo. Tal equilibrio debe evaluarlo el líder de proyecto junto a Mantenimiento. El siguiente ejemplo explica lo antedicho.

Ejemplo 11.4.1

Se presentan dos alternativas para cierto proyecto de inversión de una máquina nueva. El horizonte de utilidad se considera el mismo para las dos opciones y es 10 años (N_U = 10 años). El resto de los datos se ilustran en las tablas de la figura 11.4.1. El color gris resalta aquellos datos que difieren entre las dos opciones. Aplicando las ecuaciones 11.4.3 y 11.4.4 se obtienen ambos valores de LCC.

---

1 Ver Anexo IX "Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LLC – Life Cycle Cost)".

LCC (Opción 1)		
C_{AD}	Costo total de la inversión	$ 380.000
F_{VA}	Factor de valor actual	6,145
N_U	Horizonte de utilidad	10
GM_A	Gasto anual de mantenimiento	$ 3.200
GM	Gasto total de mantenimiento	$ 32.000
GE_A	Gasto anual de explotación	$ 20.000
GE	Gasto total de explotación	$ 200.000
C_{DIS}	Costo de disposición final	$ 26.000
V_R	Valor residual de venta	$ 35.000
r	Tasa de interes	10%
LCC	Costo de Ciclo de Vida	$ 1.796.540

LCC (Opción 2)		
C_{AD}	Costo total de la inversión	$ 435.000
F_{VA}	Factor de valor actual	6,145
N_U	Horizonte de utilidad	10
GM_A	Gasto anual de mantenimiento	$ 2.650
GM	Gasto total de mantenimiento	$ 26.500
GE_A	Gasto anual de explotación	$ 16.800
GE	Gasto total de explotación	$ 168.000
C_{DIS}	Costo de disposición final	$ 26.000
V_R	Valor residual de venta	$ 35.000
r	Tasa de interes	10%
LCC	Costo de Ciclo de Vida	$ 1.621.118

Figura 11.4.1
Tabla comparativa para un proyectos de inversión.

La inversión inicial de la opción 1 es casi un 15% más económica que la de la opción 2. Pero la opción 2 ofrece gastos de explotación y mantenimiento menores. El resultado es que el LCC de la opción 2, transcurridos 10 años de explotación y a valor actual, será $175.421 menor que la opción 1.

En términos globales las malas decisiones de un proyecto indefectiblemente se pagan en la etapa de explotación. Por tal motivo, la participación de Mantenimiento es obligatoria desde el inicio de cualquier proyecto de inversión; vale decir, desde el inicio del ciclo de vida del activo.

11.4.1 Renovación de activos y estrategias de Mantenimiento

La eficacia del parque de máquinas de una industria depende de la política de renovación de sus activos y, por supuesto, de la política de mantenimiento. Por lo tanto, ambos lineamientos deben ser compatibles.

En varias ocasiones los directivos de Planta – y los Jefes de Mantenimiento – se enfrentan a la incertidumbre de si es o no económicamente conveniente renovar un equipo. Se presentan las alternativas de hacerle una reparación mayor al activo en uso para acondicionarlo a "nuevo" o, directamente, reemplazarlo por otro. Se conocen varias formas de comparar alternativas. Aquí presentamos un método sencillo que permite arribar a resultados bastante equilibrados sin demasiados cálculos.

El método consiste en evaluar el *gasto anual integral* según las ecuaciones que se muestran a continuación, y optar por el de menor valor. La ecuación 11.4.5 estima el gasto anual esperado para el equipo existente (GA_E), haciéndole la reparación mayor. Por su parte, la ecuación 11.4.6 considera el gasto anual para una máquina nueva (GA_N) de igual capacidad. Ninguna de las ecuaciones asume mejoras productivas ni de calidad; las que requerirían otro tipo de análisis.

$$GA_E = (VA_E + CR_E)\ \frac{r\,(1+r)^{H_E}}{(1+r)^{H_E}-1} - VR_E\ \frac{r}{(1+r)^{H_E}-1} + GE_E + GM_E \qquad 11.4.5$$

$$GA_N = Vad_N\ \frac{r\,(1+r)^{H_N}}{(1+r)^{H_N}-1} - VR_N\ \frac{r}{(1+r)^{H_N}-1} + GE_N + GM_N \qquad 11.4.6$$

H_E es el período de explotación esperado para el equipo existente luego de la reparación mayor cuyo costo estimado es CR_E. VA_E es el valor actual de la máquina existente, VR_E el valor de reventa o residual del equipo existente transcurrido H_E, GE_E el gasto de explotación anual y GM_E el gasto de mantenimiento anual.

En lo que respecta a la segunda ecuación, Vad_N es el costo de la inversión para reemplazar el equipo existe por el nuevo, H_N el horizonte esperado de utilidad para el nuevo activo, VR_N el valor de venta residual transcurrido H_N y GE_N y, GM_N, los gastos de explotación y mantenimiento anual respectivamente.

Ejemplo 11.4.2

Supóngase una situación en la que debe decidirse por la reparación de una máquina frente a la posibilidad de adquirir una nueva. Los datos para las dos opciones se muestran en la tabla de la figura 11.4.2. Obsérvese que el horizonte de utilidad para la máquina existente es 3 años ($H_E = 3$) mientras que para la nueva es 15 años ($H_N = 15$). El gasto necesario para reparar el equipo existente es de $28.500 y se supone que con esta reparación operará satisfactoriamente durante H_E. Aplicando las ecuaciones 11.4.5 y 11.4.6 se obtiene el gasto anual esperado para la nueva instalación (GA_N) y el gasto anual para la instalación existente (GA_E).

Método del Valor Anualizado					
Opción 1 (Máquina Existente a Reparar)			**Opción 2 (Máquina Nueva a Adquirir)**		
VA_E	Valor actual del activo existente	$ 65.000	Vad_N	Costo inversión nueva instalación	$ 285.000
CR_E	Costo de la gran reparación	$ 28.500	--	--	--
H_E	Horizonte de utilidad	3	H_N	Horizonte de utilidad	15
VR_E	Valor residual transcurrido N_E	$ 30.000	VR_N	Valor residual transcurrido N_N	30.000
GM_E	Gasto anual de mantenimiento	$ 4.500	GM_N	Gasto anual de mantenimiento	$ 4.100
GE_E	Gasto anual de explotación	$ 25.000	GE_N	Gasto anual de explotación	$ 24.000
r	Tasa de interes	10%	r	Tasa de interes	10%
GA_E	Gasto anual instalación existente	**$ 58.034**	GA_N	Gasto anual instalación nueva	**$ 64.626**
Este método permite analizar instalaciones con distinto horizonte de utilidad.					

Figura 11.4.2
Tabla comparativa del método del Valor Anualizado.

En el ejemplo puede observarse que para esta situación particular resulta conveniente reparar el activo en uso, frente al potencial reemplazo por uno nuevo.

11.5 Presupuesto de Mantenimiento

Un presupuesto de mantenimiento es una previsión de gastos; una estimación documentada de las partidas económicas que se destinarán, justificadamente, a la gestión de activos. En ingles *budget*, es la expresión en términos económicos del plan de mantenimiento, por lo que debe contemplar los planes a corto, mediano y largo plazo. Se utiliza como herramienta de gestión administrativa para control de gastos.

Por lo general, los presupuestos se elaboran para períodos anuales aunque pueden existir presupuestos semestrales y hasta quinquenales dependiendo de la estabilidad monetaria y de la capacidad de planificación de la organización. Su elaboración requiere la participación de todos los directa e indirectamente involucrados en los gastos de mantenimiento. Es un error común elaborar los presupuestos a nivel gerencial y luego intentar cumplirlos. Aquellas empresas más interesadas en controlar sus gastos, llevan la apertura hasta la ejecución misma de cada tarea pasando por el gasto puntual y acumulado de cada activo. Esto permite identificar aquellos equipos que demandan mayor cantidad de recursos.

Todo presupuesto debe contemplar eventualidades. Además, el *nivel de presupuestación* debe ser equilibrado; suficientemente profundo para controlar los gastos más influyentes y, a la vez, simple para no perder de vista lo importante. La previsión de gastos (materializada a través del presupuesto) debe contener, al menos, los conceptos mano de obra, materiales y servicios. Puede utilizarse una estructura de cuentas contables para agruparlos. Consolidando todas las cuentas se arma el presupuesto total para el período definido de trabajo.

Lo más sencillo y accesible es trabajar en hojas de cálculo con formato corporativo (todas las áreas usan la misma planilla), pues las pautas presupuestarias deben obedecer a un único patrón.

PLANTAS	Año 07						Año 08					
	Gasto u$s				Costo u$s/Tn		Gasto u$s				Costo u$s/Tn	
	Mat.	Ter.	M. de Ob.	Total	u$s/Tn	Tn	Mat.	Ter.	M. de Ob.	Total	u$s/Tn	Tn
CARTON	16247	10536	8337	35120	0,41	85776	22739	13965	12342	49045	0,42	115549
PLEGADOS	7652	1279	1033	9963	0,58	17231	7797	1877	1165	10839	0,45	24085
TERMINADOS	19685	19942	13469	53095	0,58	92057	25195	14069	15727	54990	0,43	128869
Planta BIO	148971	54002	65698	268671	0,60	450694	144961	98367	61511	304839	0,54	568042
Buenos Aires	1526	3035	1908	6468	0,41	15638	4031	1304	2422	7757	0,34	22734
Total Negocio "XX"	194080	88793	90445	373317	0,56	661396	204722	129582	93166	427470	0,50	859279
CAPITAL	27298	9282	10578	47157	1,08	43604	22937	12219	14393	49549	1,04	47794
INTERIOR	38399	22116	21933	82448	0,69	119644	35100	26601	26873	88574	0,67	132762
SERVICIOS	33620	15855	25117	74592	0,67	111883	32210	12558	32795	77563	0,61	127423
MENDOZA	32566	18277	37527	88370	0,67	132568	35539	17089	35106	87733	0,67	131020
SANTA FE	99853	48933	72135	220921	0,65	342496	95880	42883	79736	218499	0,62	351254
Total Negocio "YY"	231736	114463	167289	513487	0,68	750196	221665	111350	188902	521918	0,66	790253
Total Argentina	425815	203256	257734	886804	0,63	1411592	426388	240931	282069	949388	0,58	1649532
Exterior												
CHILE	6312	1548	10656	18516	0.93	19906	6372	1799	11142	19313	0.86	22439
URUGUAY	37250	14243	32457	83950	0.86	97265	34186	16607	30892	81684	0.86	94919
PERU	32303	7315	24629	64247	1.00	64499	28308	8316	22599	59222	0.79	74725
BOLIVIA	5151	8142	11580	24872	0,83	29837	5586	6437	7922	19944	0,50	40038
PARAGUAY	25898	20279	12003	58180	1,60	36267	30788	24032	13714	68534	1,25	54640
Total Exterior	106913	51526	91325	249764	1,01	247774	105240	57190	86267	248697	0,87	286761
Total Grupo	532728	254781	349059	1136568	0,68	1659366	531628	298121	368336	1198085	0,62	1936294

Figura 11.5.1 Planilla de cálculo para la elaboración de un presupuesto de mantenimiento.

La figura anterior muestra un ejemplo ficticio de apertura de gastos para distintas unidades de negocio. La modalidad de planillas de cálculo permite abrir cada unidad en los conceptos que la componen.

		Mantenimiento de maquinaria y equipos	Mantenimiento de bienes mueble	Mantenimiento de Obra Civil	Mantenimiento de vehículos	TOTAL
CARTÓN	U$	122298	684	18810	9772	**151564**
PLEGADOS	U$	150950	600	7689	19646	**178885**
TERMINADOS	U$	46708	49	5980	5259	**57996**
PLANTA BIO	U$	45639	0	10794	5466	**61899**
BUENOS AIRES	U$	31298	534	2850	5031	**39713**
Total Negocio "XX"	**U$**	**396893**	**1866**	**46123**	**45174**	**490056**
CAPITAL	U$	34454	0	2922	3376	**40753**
INTERIOR	U$	168868	977	11684	16118	**197647**
SERVICIOS	U$	5129	0	578	803	**6511**
MENDOZA	U$	41400	229	2745	5537	**49911**
SANTA FE	U$	11062	0	291	616	**11969**
Total Negocio "YY"	**U$**	**260914**	**1206**	**18220**	**26451**	**306791**
Total Argentina	**U$**	**657807**	**3072**	**64343**	**71624**	**796847**

Figura 11.5.2 Planilla de cálculo para la elaboración de un presupuesto de mantenimiento.

Nota: Ninguna de las planillas anteriores guarda una relación numérica entre ellas.

Lineamientos generales de presupuestación

√ Consolidar la información por sector productivo (planta, proceso, línea, sistema, máquina, etc.). Asignar responsabilidades por dueño de proceso / máquina.
√ Asegurar que todos los sitios productivos respeten los lineamientos de carga de gastos. Aplicar distintos criterios de imputación desfavorece el benchmarking interno.
√ En la medida de lo posible, discriminar los gastos según los distintos tipos de planes de mantenimiento.
√ Las cuentas contables deben coincidir con las utilizadas en el sistema informático (SIM).
√ Las tareas extraordinarias de mantenimiento o de muy baja frecuencia (mayor a 3 años) deben discriminarse y justificarse según el motivo correspondiente.
√ Asegurar que los gastos previstos para modificaciones o reformas no sean incluidos en las cuentas de mantenimiento al elaborar el presupuesto.
√ Prever una calendarización mensual por concepto y cuenta contable.

Para consolidar correctamente el presupuesto, los responsables de hacerlo deben contar con información actualizada. El extremo del absurdo sería presupuestar gastos de mantenimiento para una línea de producción que no funcionará durante el período en consideración. Aunque parezca inverosímil, esta situación se ha presentado en más de una oportunidad.

11.5.1 Criterios de Presupuestación

Se usan distintos criterios para confeccionar presupuestos, aquí se describen sucintamente dos.

11.5.1.1 Por valores históricos o Presupuesto Incremental

Aunque a veces objetada, esta modalidad es muy utilizada. Posee algunas ventajas por sobre los demás tipos de presupuestación. Consiste en prever los gastos del próximo año según el comportamiento de los gastos de años anteriores. Se conoce como método del presupuesto incremental porque toma como punto de partida el presupuesto existente. A partir del histórico, se estudian adiciones o recortes según las nuevas operaciones, actividades o variaciones monetarias. Lamentablemente no facilita la optimización de tareas repetitivas; se asume que lo que siempre se hizo es correcto. El objetivo es reducir el gasto como un porcentaje de los gastos incurridos en años anteriores. Los presupuestos del tipo incremental se aplican con éxito en entornos poco competitivos.

Una ventaja (y a la vez desventaja) es que se reducen las sorpresas. Se analizan los gastos de años anteriores como un conjunto confuso de partidas y, a partir de allí, se proponen mejoras o reducciones de acuerdo a las necesidades financieras de la organización. Una manera de optimizar este método de presupuestación es cruzar la información contable con las rutinas de mantenimiento cuyas frecuencias sean mayores al año.

La presentación calendaria y mensual de gastos es sencilla, porque se conoce históricamente cómo es el comportamiento de los gastos mes a mes. Podrá haber meses de mayor erogación de recursos como, por ejemplo, durante una Parada de Planta. Los datos históricos deben contemplar los gastos fijos (igual para todos los años) y los gastos variables según el nivel de actividad de la empresa. El área contable es quien define la actualización monetaria, provocada por variaciones de precios y otros conceptos financieros proyectados.

11.5.1.2 Por valores calculados o PBC (Presupuesto Base Cero)

Esta metodología no es nueva; los primeros indicios de su aplicación se remontan al inicio de la década del 70'. Muchas empresas aplican la metodología *base cero* para estimar y controlar sus partidas presupuestarias. Ha demostrado ser muy eficaz cuando se aplica correctamente.

El método parte de la premisa que a todo gasto debe probársele su eficacia (retorno), y que ninguno de los gastos históricos tiene el derecho de formar parte del nuevo presupuesto por el sólo hecho de haber existido en presupuestos anteriores.

Se utilizan *paquetes de decisión*. Un paquete de decisión es un grupo de conceptos o rubros presupuestarios. A cada paquete se le asigna un responsable o *dueño de paquete* y es éste quien define el nivel de gastos en base a cálculos desde el "cero gasto inicial". El método se despoja de cualquier valor histórico; toda actividad futura será justificada para garantizar un beneficio mayor al costo que significa efectuarla[1].

La expectativa futura es lo único que interesa en este modelo presupuestario. Es común optar por presupuestos base cero cuando los gastos actuales superan las previsiones y cuando no es sencillo controlarlos. Un presupuesto base cero tiene la finalidad de focalizar la atención en los gastos precisos y no sólo en reducir porcentualmente las partidas anteriores. Los recursos económicos son aprovechados más eficazmente y las reducciones alcanzadas son selectivas y no generalizadas o arbitrarias. Sin embargo, es un método más laborioso.

En un presupuesto base cero se asume que la organización recién comienza su actividad presupuestaria, evaluando, analizando y justificando cada gasto por separado y en forma unitaria. La modalidad obliga a planificar cada actividad con rigurosidad y meticulosidad. Nada queda librado a la arbitrariedad de quien solicita el gasto.

Un presupuesto base cero requiere mayor participación de los responsables de mantenimiento y de sus colaboradores. Cada integrante del equipo describe sus actividades y las valoriza de acuerdo a las normas de la organización y del paquete correspondiente. Así, por ejemplo, un planificador de mantenimiento deberá describir las rutinas de cada activo y valorizarlas de acuerdo a los gastos previstos por materiales, mano de obra y servicios contratados. La elaboración de un presupuesto base cero contempla las etapas de diseño de paquetes, asignación de responsables, definición de objetivos y metas, definición de indicadores de seguimiento, discusión de alternativas y opciones de cambio, justificación de las actividades, ordenamiento de prioridades, ajuste y cierre final.

Ciertos autores sostienen que la técnica de presupuesto base cero reduce el *incrementalismo* propio de los presupuestos tradicionales.

11.5.2 Control Presupuestario

El control presupuestario consiste en comparar las cifras del presupuesto vigente contra los gastos reales incurridos hasta el período considerado de análisis. El análisis debe alcanzar la máxima apertura hecha en el presupuesto y los desvíos existentes deben ser explicados directamente por las personas involucradas, independientemente del nivel que ocupen en la estructura jerárquica de la organización.

El control del presupuesto permite evaluar los desvíos y hacer los ajustes necesarios a tiempo, anticipando aún mayores desvíos. Lo usual es efectuar reuniones mensuales a las que acudan los directamente interesados en cumplir con el gasto de mantenimiento. Con la presencia de las máximas autoridades de la empresa se discuten las estrategias para entrar en presupuesto, se evalúan los gastos corrientes acumulados y, en caso de haber desvíos, el responsable de la partida explica los motivos.

En las reuniones de control o seguimiento del presupuesto debe utilizarse siempre el mismo paquete de indicadores corporativos (ver Capítulo 12). Hay que evitar que los distintos sectores utilicen indicadores y formatos diferentes para mostrar sus gastos porque se vuelve tedioso analizar la información de cada sector. Producción, presente en las reuniones de control, debe indicar los costos adicionales ocasionados por problemas de confiabilidad o disponibilidad en el sistema productivo.

Una forma de analizar los gastos de mantenimiento, es dividir el tablero de control según los siguientes rubros o clases de gasto:

√ Mano de obra propia.
√ Repuestos, materiales e insumos.
√ Servicios especiales subcontratados y mano de obra externa.
√ Otros gastos indirectos.

---

1 La metodología RCM (Reliability Centred Maintenance) es una herramienta de decisión que encaja perfectamente en este modelo presupuestario. Ver figura 7.2.11 del Capítulo 7.

11.6 Indicadores de Gestión de Costos de Mantenimiento

Aunque explicados con más profundidad en el próximo capítulo, los principales indicadores de seguimiento para los gastos de mantenimiento son los siguientes:

- √ Gasto total
- √ Gasto por unidad de negocio o unidad productiva
- √ Gasto por subsistema operativo
- √ Gasto por activo relevante
- √ Gasto vs. facturación compañía (costo mantenimiento / facturación)
- √ Gasto vs. valor de reposición de activos (costo mantenimiento / valor de reposición)
- √ Gasto vs. gasto de producción (costo mantenimiento / producción)
- √ Gasto de personal vs. gastos por contratación (costo personal / contratación)
- √ Gasto total vs. horas total talleres (costo horas talleres)

En todos los casos se compara el gasto real acumulado con los valores de presupuesto abierto en repuestos, mano de obra y servicios contratados.

Resumen de aplicación

11.1 Introducción

- *El área de mantenimiento debe asegurar que las funciones de los equipos se cumplan en un marco de conveniencia técnico - económica.*

- *El costo de un producto o servicio está seriamente influenciado por el gasto de mantenimiento.*

- *La pérdida de utilidad por falta o exceso de mantenimiento, está implícito en las ecuaciones de conveniencia económica de cada una de las estrategias analizadas en los capítulos anteriores.*

- *El gasto de evitar fallas y el gasto de repararlas (mano de obra, materiales y servicios), más el gasto indirecto de llevar adelante la administración de las estrategias de mantenimiento, forman parte de los gastos operativos (GO) de una empresa.*

- *El gasto de mantenimiento lo fija el negocio a través del contexto operativo; y la empresa lo presupuesta. El gasto total de mantenimiento de una Planta es la suma de los gastos necesarios para que cada activo cumpla las funciones previstas en el contexto operativo óptimo para el negocio en ese momento.*

- *El monto anual del gasto en mantenimiento para obtener de un activo el rendimiento que se necesita, es único; lo que no significa que sea sencillo de calcular.*

11.2 Tipos de Gastos (Visión Tradicional)

- *Tradicionalmente los gastos de mantenimiento se agrupan de acuerdo a dos criterios; por tipo de gasto y por la relación con el volumen de actividad.*

11.2.1 Gastos de Mano de Obra

- *La dotación permanente dedicada a tareas técnicas y administrativas es un gasto fijo. Los gastos directos de mano de obra, para acciones pro-activas y reactivas de todo el parque de máquinas, surgen de planificar la demanda de dichas acciones en función del plan de mantenimiento de cada activo.*

- *Con el importe proporcional por mano de obra informado por el proveedor, se calculan las horas hombre (a valor promedio) que representa dicho importe facturado. La dotación propia (gasto fijo) más el número de personas equivalente a las horas hombre (gasto variable), representan las FTE (full total equivalent) o número total de personas que han sido necesarias para hacer frente a todas las tareas de mantenimiento en determinado período.*

11.2.2 Gastos de Materiales

- *Los gastos de materiales se generan por los repuestos retirados del Almacén y consumidos en las tareas reactivas y pro-activas, y por las compras de materiales con el mismo fin.*

11.2.3 Gastos de Terceros

- *El nivel de gastos en terceros o servicios contratados (outsourcing) depende de muchos factores, pero sobre todo de la situación geopolítica de la zona de operación y de la política corporativa de la compañía. No existe una verdad absoluta en este sentido, cada empresa debe disponer de los servicios de terceros en la medida de su conveniencia.*

11.2.4 Gastos Financieros

- *Forman parte de este rubro el gasto financiero por mantener el stock inmovilizado de repuestos y el costo de amortización de equipos o instrumental sofisticado para tareas de complejidad técnica. Incluso, hay empresas que incluyen los costos de amortización de los equipos back-up o stand-by.*

11.2.5 Gastos por Fallos

- *Los gastos por fallos (también llamados gastos de consecuencias o inducidos) se refieren a la pérdida de beneficios que la empresa afronta por causas directa o indirectamente vinculadas con el accionar de mantenimiento; vale decir, los perjuicios derivados del mal funcionamiento de los equipos. A veces, este gasto no se considera, aún siendo importante.*

11.2.6 Gastos Fijos

- *Los gastos fijos son las erogaciones de dinero en las que incurre la empresa independiente del volumen de actividad. Por ejemplo, la mano de obra del personal permanente operativo y administrativo es un gasto fijo que no depende del número de intervenciones pro-activas o reactivas (una vez establecida la dotación óptima). Es un gasto fácil de presupuestar.*

11.2.7 Gastos Variables

- *Por su parte, los gastos variables son todos los que guardan cierta relación con el volumen de actividad de Mantenimiento o con el régimen de funcionamiento de los equipos Por ejemplo, las intervenciones correctivas para solucionar fallos imprevistos que requieran la realización de horas extras, son gastos variables. De la misma forma que las consecuencias económicas que éstos provocan.*

11.3 Gasto Integral de Mantenimiento

- *Las empresas que buscan resultados favorables a mediano y largo plazo basan la gestión de sus activos en el gasto integral de mantenimiento.*

- *Una visión integral de los gastos de mantenimiento permite realizar análisis sistémicos de la influencia de las acciones de mantenimiento en el negocio. Analizar los gastos aisladamente no permite tal abordaje quitando realismo a cualquier análisis, tampoco permite tomar decisiones de importancia. El gasto integral de mantenimiento deja ver tanto los beneficios de la gestión de los activos como el perjuicio que la misma puede ocasionar.*

11.3.1 Visión de la Contabilidad del Valor

- *Mantenimiento debe ejecutar las acciones justas para cada activo en el momento justo, y saber que cualquier tarea por demás puede ser contraproducente.*

- *Cualquier beneficio, por menor que sea, en los equipos cuellos de botella es más ventajoso que otra tarea que parezca, en principio, más productiva.*

- *La única manera de obtener resultados concretamente favorables, es trabajando en conjunto con el sector Contable.*

11.4 Ciclo de Vida de los Activos

- *El LCC (del inglés Life Cycle Cost) tiene en cuenta el costo de adquisición de la instalación completa de un equipo, el gasto total de su operación y los costos derivados de su descarte u obsolescencia.*

- *Debe hallarse un equilibrio entre los costos de inversión o adquisición y los gastos de operación. Una baja tasa de mantenibilidad - a raíz de un mal diseño - incrementa los gastos de operación durante todo el período de operación o explotación.*

11.4.1 Renovación de activos y estrategias de Mantenimiento

- *La eficacia del parque de máquinas de una industria depende de la política de renovación de sus activos y, por supuesto, de la política de mantenimiento. Por lo tanto, ambos lineamientos deben ser compatibles.*

11.5 Presupuesto de Mantenimiento

- *Un presupuesto de mantenimiento es una previsión de gastos; una estimación documentada de las partidas económicas que se destinarán, justificadamente, a la gestión de activos. Es la expresión en términos económicos del plan de mantenimiento, por lo que debe contemplar los planes a corto, mediano y largo plazo.*

- *Su elaboración requiere la participación de todos los directa e indirectamente involucrados en los gastos de mantenimiento.*

- *El nivel de presupuestación debe ser equilibrado; suficientemente profundo para controlar los gastos más influyentes y, a la vez, simple para no perder de vista lo importante.*

11.5.1 Criterios de Presupuestación

11.5.1.1 Por valores históricos o Presupuesto Incremental

- *Consiste en prever los gastos del próximo año según el comportamiento de los gastos de años anteriores.*

- *Se conoce como método del presupuesto incremental porque toma como punto de partida el presupuesto existente. A partir del histórico, se estudian adiciones o recortes según las nuevas operaciones, actividades o variaciones monetarias.*

- *Se analizan los gastos de años anteriores y, a partir de allí, se proponen mejoras o reducciones de acuerdo a las necesidades financieras de la organización.*

11.5.1.2 Por valores calculados o PBC (Presupuesto Base Cero)

- *El método parte de la premisa que a todo gasto debe probársele su eficacia (retorno), y que ninguno de los gastos históricos tiene el derecho de formar parte del nuevo presupuesto por el sólo hecho de haber existido en presupuestos anteriores.*

- *Se utilizan paquetes de decisión. Un paquete de decisión es un grupo de conceptos o rubros presupuestarios. A cada paquete se le asigna un responsable o dueño de paquete, y es éste quien define el nivel de gastos en base a cálculos desde el "cero gasto inicial".*

- *El método se despoja de cualquier valor histórico; toda actividad futura será justificada para garantizar un beneficio mayor al costo que significa efectuarla.*

- *Los recursos económicos son aprovechados más eficazmente y las reducciones alcanzadas son selectivas y no generalizadas o arbitrarias.*

- *La modalidad obliga a planificar cada actividad con rigurosidad y meticulosidad. Nada queda librado a la arbitrariedad de quien solicita el gasto.*

- *Un presupuesto base cero requiere mayor participación de los responsables de mantenimiento y de sus colaboradores. Cada integrante del equipo describe sus actividades y las valoriza de acuerdo a las normas de la organización y del paquete correspondiente.*

11.5.2 Control Presupuestario

- *El control presupuestario consiste en comparar las cifras del presupuesto vigente contra los gastos reales incurridos hasta el período considerado de análisis. El análisis debe alcanzar la máxima apertura hecha en el presupuesto y los desvíos existentes deben ser explicados directamente por las personas involucradas, independientemente del nivel que ocupen en la estructura jerárquica de la organización.*

- *En las reuniones de control o seguimiento del presupuesto debe utilizarse siempre el mismo paquete de indicadores corporativos. Hay que evitar que los distintos sectores utilicen indicadores y formatos diferentes para mostrar sus gastos porque se vuelve tedioso analizar la información de cada sector.*

11.6 Indicadores de Gestión de Costos de Mantenimiento

- *Los principales indicadores de seguimiento para los gastos de mantenimiento son los siguientes:*

  Gasto total
  Gasto por unidad de negocio o unidad productiva
  Gasto por subsistema operativo
  Gasto por activo relevante
  Gasto vs. facturación compañía (costo mantenimiento / facturación)
  Gasto vs. valor de reposición de activos (costo mantenimiento / valor de reposición)
  Gasto vs. gasto de producción (costo mantenimiento / producción)
  Gasto de personal vs. gastos por contratación (costo personal / contratación)
  Gasto total vs. horas total talleres (costo horas talleres)

Capítulo 12

Medición y Control del Mantenimiento

El experimentador que no sabe lo que está buscando no comprenderá lo que encuentra[1].

---

1 Claude Bernard (1813 - 1878) filósofo francés.

Objetivos del Capítulo

A lo largo de este capítulo el lector podrá:

- √ Comprender la importancia de medir la gestión de mantenimiento a través de indicadores.
- √ Seleccionar el mejor grupo de índices para evaluar el desempeño de los procesos.
- √ Diferenciar entre indicadores de eficacia, eficiencia y efectividad.
- √ Relacionar los indicadores con la gestión global de equipos y los aspectos administrativos.
- √ Confeccionar un Tablero de Control para el departamento Mantenimiento.
- √ Participar en auditorias de mantenimiento.

Índice de Contenidos

12.1 Introducción
- Implementación de Indicadores
- Propiedades que deben satisfacer los Indicadores

12.2 Agrupación y Clasificación

12.3 Desarrollo de Indicadores
- Gestión Operativa
- Gestión de Órdenes de Trabajo
- Mantenimiento
- Gestión de Repuestos (Inventario)
- Gestión de Mejoras
- Personal
- Seguridad y Medio Ambiente
- Gestión de Gastos / Costos

12.4 Tableros de Control de Mantenimiento
- Reporte Gerencial
- Reporte Corporativo (o de Divulgación)
- Reporte de Ingeniería de Mantenimiento
- Reporte Operativo

12.5 Mejorar a partir de la medición diaria

12.6 Diagnósticos de Mantenimiento

Resúmen de aplicación

12.1 Introducción

Los actuales modelos de gestión se valen de indicadores para medir el comportamiento de los procesos[1] industriales y tomar decisiones en consecuencia. Su utilización no es sólo cuestión de moda; es una necesidad objetiva entendida, cada vez, por más cantidad de gente.

La aplicación de indicadores en el área de Mantenimiento permite, por un lado, conocer cuál es el estado actual de situación (la realidad) y saber si las estrategias y políticas vigentes son las apropiadas para el negocio. También, y si los indicadores son correctos, permite evidenciar las variaciones - para bien o mal - en la efectividad de los procesos y proponer alternativas de mejora para aquellos con mayor debilidad.

La selección del paquete de indicadores para cada caso debe partir de un entendimiento claro de cada índice, de su jerarquización y escalonamiento en el grupo, y de la distribución que se haga de ellos en los distintos procesos del área. La medición y control del mantenimiento deben ser permanentes; un seguimiento periódico de los indicadores, así como su ajuste y optimización, facilita el logro de resultados confiables y consistentes. Por el contrario, las evaluaciones aisladas o esporádicas no dejan capitalizar el beneficio potencial que un buen paquete de índices puede tener.

Hay quienes aún suponen que llevar indicadores de gestión es una tarea impuesta por el personal administrativo, "los que están detrás de un escritorio". Sin embargo, es fácil ver que todo proceso (industrial o no) puede mejorarse sólo si se identifican objetivamente las áreas de oportunidad y las causas que impiden su progreso.

Pero la perspectiva esquiva de gestionar y trabajar con indicadores tiene cierto fundamento empírico. Sucede que algunas organizaciones lanzaron planes corporativos de implantación de indicadores a gran escala cuyo resultado fue un fracaso. En tales casos, pudo comprobarse que las causas estuvieron relacionadas, al menos, con alguno de los siguientes puntos.

En principio los índices eran demasiados y, además, poco advertían de los problemas reales, lo que no permitía que las debilidades (oportunidades de mejora) fueran identificadas. Sin embargo, el mayor inconveniente advertido fue que no existía una concatenación o coherencia entre todos los índices de los distintos niveles jerárquicos. Es decir, los resultados favorables de los indicadores más elementales (por ejemplo, los del piso de Planta) no eran consecuentes con los resultados de los índices superiores o primaros; mientras los indicadores de Planta mejoraban, los usados a nivel gerencial se mantenían igual o, incluso, empeoraban.

Un error habitual es creer que los indicadores son sólo para los Gerentes, y que todo aquel que los utiliza en su trabajo cotidiano, no ve la realidad de la Planta tal cual es. Sin embargo, aquellas organizaciones que escogen sus indicadores en base a un estudio profundo, proponen pocos y buenos, y los gestionan adecuadamente, alcanzan las metas y los objetivos buscados con toda seguridad. Que sean pocos, facilita el manejo y evita la dispersión; que sean buenos permite medir efectivamente el rendimiento de cada proceso.

Con una suficiente cantidad de indicadores (pocos y buenos), cada área del departamento de Mantenimiento puede armar su propio **Tablero de Control** (TC). Un tablero de control o Reporte, se confecciona en base a un conjunto de indicadores asociados a metas y objetivos alcanzables y permite evaluar, rápida y fácilmente, el desempeño de los procesos. El objetivo de cada indicador del reporte, aún el más básico, deberá estar alineado con los objetivos corporativos de la organización. Cabe reiterar el criterio coincidente de varios especialistas reconocidos del ámbito industrial quienes sostienen que un número elevado de índices resulta contraproducente; es preferible seleccionar un paquete reducido y administrarlo eficazmente. De nada sirve un tablero de control con cientos de indicadores que al analizarlos sea imposible tener una idea rápida del estado situacional del proceso. Téngase en cuenta que los reportes (y sus indicadores) son únicamente herramientas de medición, no un objetivo en sí mismo.

En adelante, se pretende mostrar un conjunto de indicadores del cual los responsables de Mantenimiento puedan escoger aquellos que mejor resuelvan la situación de medición y control de sus procesos relevantes y tomar, en consecuencia, decisiones acertadas.

---

1 Recuérdese que un proceso es una secuencia de actividades relacionadas con un punto de inicio y otro de fin.

Siendo que las actividades de Mantenimiento no están ajenas a la actividad económica y financiera de la empresa, se presentan indicadores vinculados con aspectos económicos de la gestión. También, aparecen índices que miden la efectividad del proceso administrativo y la planificación del área. No se descuidan, tampoco, aquellos que evalúan la gestión operativa del Almacén de Repuestos, por mencionar algunos.

12.1.1 Implementación de Indicadores

Aceptada la necesidad de contar con, al menos, algunos índices, es preciso transitar ciertos pasos para obtener el resultado esperado. Ingeniería de Mantenimiento tiene un rol protagónico en tal sentido porque la elección, diseño, implementación y optimización, son parte de sus responsabilidades. También debe tenerse en cuenta la realimentación de los índices; deben evaluarse los objetivos regularmente, identificarse los inconvenientes, y proponerse alternativas de mejora. Algunas organizaciones, lamentablemente, seleccionan sus indicadores sólo en función de la facilidad en obtener los datos de formación[1]. Aún no siendo ésta del todo una mala práctica, es mejor camino identificar el proceso a medir y mejorar, evaluar qué indicadores son capaces de medirlo con precisión, asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los datos que nutrirán los indicadores y, por último, implementarlos y gestionarlos.

Sin duda, esto suele resultar mucho más laborioso, pero también más efectivo.

Otro aspecto de mucha importancia es definir claramente el alcance. Una cosa es medir la disponibilidad de una máquina aislada del contexto de funcionamiento y otra muy distinta medir la disponibilidad de todo un proceso de transformación. Cierto sector de Mantenimiento podría estar interesado en medir los gastos totales en una línea de producción o en una sola máquina; mientras que la Gerencia de Planta seguramente estará interesada en conocer la evolución de los gastos de toda la Planta. Por su parte, Ingeniería de Mantenimiento puede interesarse en medir la efectividad en el cumplimiento de las Órdenes de Trabajo; mientras que el Gerente de Mantenimiento tal vez quiera conocer mensualmente los valores de efectividad de todo el departamento. Las perspectivas de gestión son diferentes, según sea el punto de vista o el nivel jerárquico del observador.

El grado de dificultad para obtener los datos de formación al momento de escoger índices, también debe considerarse. Puede resultar atractivo medir cierto proceso, pero si los datos necesarios no están disponibles, no son confiables o su obtención requiere de una labor exagerada, tal vez deba replantearse la situación. En estos casos, y aunque más no sea al principio, es preferible bajar el nivel de dificultad y escoger indicadores más fáciles de calcular. Paralelamente, deben implementarse planes de acción que tiendan a regularizar y facilitar (si es verdaderamente necesario) la obtención de los datos para armar los índices inicialmente planteados. Es más, el avance hacia la nueva familia de datos puede ser un propio proceso perceptible de medirse a través de indicadores.

La frecuencia con la que deben monitorearse los indicadores depende de varios factores. En principio influye la estabilidad del proceso; si el proceso es muy inestable, la frecuencia debe aumentar (menor intervalo de tiempo entre monitoreos). También es importante la consecuencia del potencial desvío. Si una leve variación en las variables medidas tiene serias consecuencias colaterales, entonces la frecuencia debe ser mayor para tener tiempo suficiente de tomar alguna medida. Suele decirse que si una variable crítica se monitorea diariamente, no habrá sorpresas en el reporte mensual.

La frecuencia de revisión puede ser, anual, semestral, trimestral, mensual, semanal y hasta diaria. Los indicadores de los reportes se calculan para intervalos de tiempo definidos y los valores corrientes se comparan con los históricos o referenciales que fije la organización.

En la medida de lo posible, es preferible programar el cálculo y presentar los reportes dentro del mismo Sistema Informático de Mantenimiento (SIM). Los sistemas comercializados ofrecen módulos específicos de generación de reportes que, casi con seguridad, cada empresa deberá adaptarlo a sus necesidades.

---

1 Se llaman datos de formación a aquellos necesarios para calcular el indicador.

12.1.2 Propiedades que deben satisfacer los Indicadores

A continuación se presenta una lista de propiedades que todo indicador debe cumplir.

- √ Medir procesos que efectivamente sean necesarios de controlar y mejorar.
- √ Ser sensible a los cambios del proceso que mide.
- √ Ser confiable para poder tomar decisiones de importancia.
- √ Permitir que se focalicen los puntos de mayor debilidad del proceso.
- √ Satisfacer las perspectivas de los responsables del indicador.
- √ Estar alineado con los objetivos corporativos (de la Empresa y de Mantenimiento).
- √ Tener baja dificultad de cálculo.
- √ Tener baja dificultad de comprensión.
- √ Ser atractivo para los involucrados en el proceso (colaboradores).

Como el lector puede advertir, las tres primeras propiedades son las más importantes. Medir algo trivial no tiene sentido porque se desperdician recursos inútilmente. Por otra parte, si el proceso medido desmejora (o mejora) y no es reflejado por el indicador, se tiene baja o nula sensibilidad. Por último, debe ser confiable porque a partir de su resultado puede ocurrir que los responsables del área deban tomar decisiones de gran impacto como puede ser el despido de personal, la venta o compra de equipos, la cesación contractual con algún proveedor, etc.

En ocasiones, y para darle mayor confiabilidad a las mediciones, se usan índices cruzados que tienen en cuenta algunas variables en común. Por ejemplo, se evalúan dos procesos complementarios (con alguna variable en común) y se analiza la variabilidad en simultáneo. Si los indicadores responden conforme a lo imaginado, se presume la confiabilidad de la variable.

Además, no es recomendable trabajar con valores estimados; llevar únicamente indicadores basados en variables efectivamente medidas.

12.2 Agrupación y Clasificación

La bibliografía referida a la clasificación de indicadores es más que abundante. En esta parte adoptamos un criterio particular, ni mejor ni peor que los demás.

La primera clasificación sugerida es el **GRUPO**, para indicar si el indicador pertenece a los rubros *Gestión Operativa, Gestión de Órdenes de Trabajo (OT)*, etc. (figura 12.2.1).

GRUPO	Descripción
Gestión Operativa	Algunos indicadores de este grupo se analizaron en el Capítulo 1. Los mismos miden el desempeño de equipos o conjunto de equipos, el comportamiento de modos de falla, la efectividad de las diferentes estrategias de mantenimiento, etc.
Gestión de Órdenes de Trabajo (OT)	Básicamente agrupa índices que evalúan el desempeño de los procesos administrativos de las Órdenes de Trabajo.
Mantenimiento	Caen en este grupo aquellos indicadores tendientes a determinar la efectividad de las distintas estrategias de mantenimiento.
Gestión de Repuestos (Inventario)	Este grupo de indicadores evalúa los aspectos contables y administrativos de la Gestión de Repuestos y Materiales.
Gestión de Mejoras	Es un grupo de índices que monitorea la eficacia y eficiencia de las herramientas de optimización aplicadas por Mantenimiento.
Personal	Los aspectos relacionados con el desempeño de los colaboradores, se aglutinan bajo esta familia.
Seguridad	Se agrupan aquí los indicadores vinculados con aspectos de Seguridad Personal y Medio Ambiente.
Gestión de Gastos / Costos	Junto al anterior, es un grupo de gran interés. Contiene índices que miden la evolución de los factores que directamente afectan los gastos de Mantenimiento. Desafortunadamente, en muchas ocasiones, es el único grupo de indicadores que se aplica.

NIVEL de mayor uso
G: Gerencial
J: Jefatura
I: Ingeniería de Mantenimiento
S: Supervisión

TIPO de Indicador
S: Situación
E: Eficacia
EE: Eficiencia
EEE: Efectividad

DIFICULTAD
B: Baja
M: Media
A: Alta

Figura 12.2.1
Descripción de Grupo, Nivel, Tipo y Grado de Dificultad para la clasificación de Indicadores.

A su vez, y dentro de cada grupo, se clasifican los indicadores según tres características. La primera es el **NIVEL**, para indicar el estrato jerárquico que más lo utiliza como herramienta de gestión. Luego, y siendo que un indicador puede medir *estado de situación, eficacia, eficiencia* o *efectividad*, se los clasifica por **TIPO** usando las siglas S, E, EE y EEE respectivamente. Por último, se refiere el grado de dificultad para el cálculo a través de la categoría **DIFICULTAD**.

Entendemos por eficacia la capacidad de cumplir con un objetivo determinado; es una medida del logro de los resultados. La eficiencia es el cumplimiento del objetivo con el mínimo de recursos, se enfoca a usar dichos recursos (materiales, talentos, dinero, tiempo, volumen, etc.) de la mejor manera posible. La efectividad, por su parte, es el equilibrio o combinación de la eficacia y la eficiencia; un proceso eficaz y eficiente será, con toda seguridad, también efectivo.

Como se dijo, la coherencia o alineación entre los indicadores de los distintos niveles es muy importante. La apertura arbórea o en cascada genera una estructura piramidal como la ilustrada en la figura 12.2.2. Conforme se desciende, cada nivel tiene un número mayor de indicadores cuyo objetivo es controlar y mejorar los procesos que aportan beneficios tangibles a los objetivos de los niveles superiores. Cada sección, área, función, grupo de trabajo, etc. tendrá su propio paquete de indicadores específicos.

Esta es la causa por la cual al descender aumenta el número de indicadores, como ocurre con la estructura orgánica del departamento de Mantenimiento. Si la elección del paquete de indicadores de cada nivel no respeta la complementación entre niveles (cascada alineada) se distorsiona la funcionalidad del conjunto y se pierde eficacia en el cumplimiento del principal proceso monitoreado, como son las metas u objetivos de negocio.

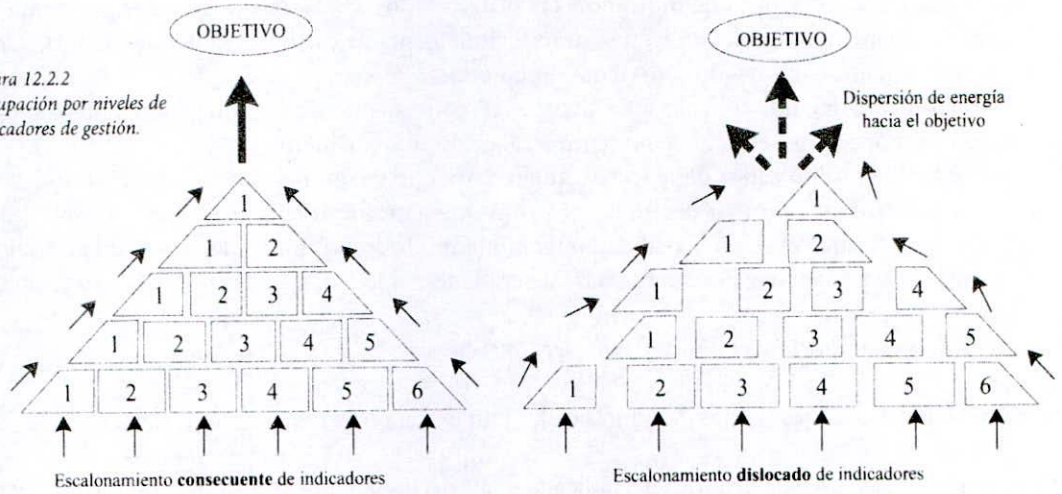


Figura 12.2.2
Agrupación por niveles de indicadores de gestión.

Obsérvese el desaprovechamiento de "*energía*" en la pirámide distorsionada de la derecha. En la figura de la izquierda el "*flujo de fuerza*" se canalizada completamente hacia los objetivos globales; en el segundo, se pierda parte de la "*energía*" por tener un esquema dislocado.

La cascada de indicadores debe comenzar por los objetivos primarios de la organización y luego abrirse en objetivos secundarios y consecuentes con los primeros. En un árbol de indicadores debe existir un hilo conductor continuo entre todos los niveles.

Por ejemplo, el gasto de mantenimiento puede ser un indicador de nivel gerencial y cada uno de los niveles inferiores de la estructura contribuir a éste a través del cumplimiento de sus funciones específicas (cuyo seguimiento se hará con otros indicadores).

A través del seguimiento de indicadores de tarifas o desempeño de terceros, un gerente de mantenimiento puede optar por la mejor decisión en cuanto a la contratación de servicios. A su vez, un operario mecánico contribuye a la meta del sector sustituyendo eficaz y eficientemente los repuestos que reemplaza (su desempeño puede medirse con indicadores de cumplimiento de órdenes de trabajo o con cantidad de retrabajos).

Cada nivel en la estructura jerárquica tendrá indicadores propios asociados a la naturaleza de sus funciones y responsabilidades, y cada uno de esos indicadores deberá estar vinculado con otros de nivel superior.

12.3 Desarrollo de Indicadores

Esta sección desarrolla los grupos de indicadores más destacados. Cada uno se describe por medio de una tabla que contiene nombre del indicador, descripción, forma de cálculo, unidad de medida, variables que intervienen en su definición y algunos comentarios.

En mayor o menor medida, y realizando los ajusten convenientes, estos indicadores pueden aplicarse también a empresas de servicios y a organizaciones sin fines de lucro.

La efectividad de un indicador depende de quién, para qué y cómo lo use. Además, un único indicador no es suficiente para tomar decisiones. Es conveniente trabajar con un paquete o conjunto de indicadores sistémicos que evalúen la realidad integralmente. Todos los indicadores son referenciales y deberán modificarse y adaptarse de acuerdo a las necesidades, objetivos y metas de la organización que los requiera.

Las decisiones de importancia nunca deben ser tomadas sin:

√ Haber relacionado los resultados de un indicador con los de otros indicadores asociados.

√ Haber evaluado la tendencia histórica del indicador; vale decir, tomando decisiones con un único valor puntual y atemporal.

12.3.1 Gestión Operativa

Muchos de los índices de este grupo, ya se analizaron en capítulos anteriores. Algunos de ellos se refieren a medidores de desempeño operativo de un activo o conjunto de activos como la disponibilidad y la confiabilidad (Capítulo 1). Otros, tratan aspectos de efectividad global de equipos como los vistos en el Capítulo 7. En cualquier caso, profundizar el contenido consultando los capítulos correspondientes.

12.3.2 Gestión de Órdenes de Trabajo

Estos indicadores, y los reportes que pueden generarse a partir de ellos, permiten evaluar la capacidad de planificación y programación del área de mantenimiento. También evidencian las fortalezas y debilidades de los procesos del sector. Particularmente los indicadores de eficiencia en el cumplimiento de OT deben aplicarse con cuidado y en conjunto con otros. Obsérvese que un valor bajo no indica, necesariamente, falta de planificación o despilfarro de talentos (horas hombre) porque las horas previstas para cada OT pueden ser incorrectas. Esto hace pensar que tales indicadores permitirán, por un lado, evaluar el adecuado uso de recursos y, por otro, ver si es correcto el tiempo previsto para cada uno de los trabajo.

Por ejemplo, el índice "Desvío promedio de cierre de OT" (figura 12.3.2) puede arrojar altos valores a consecuencia de una falta de capacitación para la ejecución de los trabajos, tiempos reales de ejecución mal estimados por el programador, etc.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Gestión Operativa	J/I	E	B	Disponibilidad Operacional	Porcentaje del tiempo realmente operativo de un equipo, con respecto al tiempo disponible o estipulado para operar. Ver sección 1.2.11 del Capítulo 1.	%	$D_o = \frac{(T_o - T_{np})}{T_o}$	T_O: Tiempo disponible para operar. T_{np} : Tiempo por paradas no programadas.	Puede usarse para una función, un equipo o conjunto de equipos. T_O no tiene en cuenta el tiempo programado para mantenimiento.
	J/I	E	M	Disponibilidad Operacional	Porcentaje del tiempo operativo con respecto al estipulado, en función del tiempo medio entre fallas y el tiempo medio para reparación.	%	$D_o = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	MTBF: Tiempo medio entre fallas. MTTR: Tiempo medio para reparación. Ver sección 1.2.11 del Capítulo 1.	Puede usarse para una función, un equipo o conjunto de equipos que se reparan luego de la detención imprevista.
	G/I	E	B	Rendimiento Operativo	Indica las pérdidas ocasionadas por operar a un régimen de marcha inferior al nominal del activo. Ver epígrafe 7.4.7.1 del Capítulo 7.	%	$R = \frac{CP_o}{T_o \cdot C_N}$	T_O: Tiempo disponible para operar. CP_O: Cantidad real producida en T_O. C_N: Cantidad nominal de producto elaborado por unidad de tiempo (capacidad nominal).	La capacidad nominal (C_N) es la cantidad de producto que, en teoría, puede fabricarse con seguridad por unidad de tiempo. Las pérdidas ocurren por retardos en alcanzar C_N o por funcionar a menores regímenes de marcha.
	G/I	E	B	Índice de Calidad	Capacidad de un sistema (activo o conjunto de activos) de producir piezas o productos sin defectos.	%	$I_C = \frac{T_{EP}}{T_{EP} + T_R}$	T_{EP} : Tiempo efectivo de producción. T_R: Tiempo necesario para rehacer la cantidad de piezas defectuosas elaboradas en el tiempo T_O.	La suma de T_{EP} y T_R es el tiempo neto de operación. Ver figura 7.4.16 del Capítulo 7.
	G/I	E	M	Eficacia Global de Equipo (EGE)	Indicador de eficacia que aglutina los tres últimos indicadores. Ver epígrafe 7.4.7.1 del Capítulo 7 y Anexo X "Análisis de Tiempos Productivos".	%	$EGE = D_o \cdot R \cdot I_c$	D_O: Disponibilidad. R: Rendimiento Operativo. I_C: Índice de Calidad.	Indicador integral de eficacia válido para el tiempo de funcionamiento. Permite evaluar la eficacia del mantenimiento. Si las estrategias son efectivas deberían reducirse las pérdidas por calidad, las detenciones imprevistas y los rechazos por defectos.
	G	S	B	Grado de Utilización	Porcentaje de utilización de un activo o conjunto de activos, con respecto al tiempo posible (calendario u horario). Ver epígrafe 7.4.7.1 del Capítulo 7.	%	$GU = \frac{T_{DO}}{T_{TC}}$	T_{DO} : Tiempo disponible para operar. T_{TC} : Tiempo calendario.	La diferencia entre el tiempo disponible para operar y el tiempo calendario puede obedecer a planificación de producción (estacionalidad), reuniones, refrigerios y tiempo para mantenimiento programado.
	G	E	M	Productividad Total de Equipo (PTE)	Combinación de los dos indicadores anteriores. Ver epígrafe 7.4.7.1 del Capítulo 7.	%	$PTE = GU \cdot EGE$	GU: Grado de Utilización. EGE: Eficacia Global de Equipo.	Obsérvese que el grado de utilización afecta porcentualmente a la eficacia global de equipo (EGE).
	I/S	E	M	Confiabilidad	Ver sección 1.2.9 "Confiabilidad de Sistemas", Capítulo 1.	%			
	I/S	E	M	Mantenibilidad	Ver sección 1.2.10 "Mantenibilidad", Capítulo 1.	%			
	G	EE	M	Eficiencia Global de Equipo (OEE)	Indicador de eficiencia que combina el aporte del Rendimiento Operativo, el Índice de Calidad y la Disponibilidad Operacional afectada, esta última, por el tiempo de paradas programadas. Ver epígrafe 7.4.7.2 del Capítulo 7.	%	$OEE = D'_o \cdot R \cdot I_c$	D'_o : Disponibilidad Operacional . Valor difiere del usado en Eficacia Global de Equipo (EGE) pues contempla el tiempo de paradas programadas. Ver ecuación 7.4.12 del Capítulo 7. R: Rendimiento Operativo. I_C: Índice de Calidad.	Indicador integral de eficiencia válido para el tiempo de funcionamiento. Permite evaluar la eficiencia de las estrategias de mantenimiento.

Figura 12.3.1
Indicadores de Gestión Operativa.

El índice "Efectividad cumplimiento de OT programadas" (figura 12.3.2) mide la eficiencia al ejecutar lo planificado (eficacia). Es la eficiencia de la eficacia. Un bajo valor puede obedecer a una programación errónea, a una ejecución poco eficiente, a problemas surgidos durante la ejecución de los trabajos o a todos estos aspectos simultáneamente. Para estos casos, resulta conveniente abrir el índice por Sector, Tipo de Órden de Trabajo, Programador, Ejecutante, etc.

A su vez, se recomienda analizar y ajustar periódicamente los valores de las horas previstas en función de los valores reales obtenidos en el cierre de las OT.

El indicador "Cumplimiento de OT correctivas" muestra la eficacia en la respuesta a las acciones reactivas solicitadas; vale decir, *cuánto se ha hecho de lo que se debía hacer*. Por su parte, el indicador "Índice de Repetición de OT correctivas" es de cálculo más complejo, aunque útil en situaciones particulares de fallos con graves consecuencias.

12.3.3 Mantenimiento

Los indicadores aquí referidos permiten evaluar la efectividad de las estrategias utilizadas en Mantenimiento para evitar o minimizar las consecuencias de los modos de falla. Se presentan algunos indicadores de eficacia, eficiencia y efectividad de los tres principales tipos de acciones pro-activas: predictivo, preventivo y detectivo. Se hace también una referencia a las rutinas de calibración.

Para las rutinas preventivas los indicadores deben evaluar la capacidad de la estrategia para eliminar fallos imprevistos en el período de previsibilidad (parte central de la curva de la bañera) con la mejor relación costo - beneficio. Para las tareas basadas en condición (mantenimiento predictivo y proactivo) se pretende determinar si las inspecciones son lo suficientemente válidas para identificar fallas sintomáticas la mayoría de las veces que éstas ocurren (confiabilidad de la técnica aplicada), así como la relación entre lo previsto que insumiría la técnica (dinero, tiempo, etc.) y lo que efectivamente insumió.

Para el caso del mantenimiento detectivo, la efectividad de la estrategia y de la acción para cumplirla (en el modo de falla del dispositivo redundante o de protección) quedan determinadas por las veces que ocurrió una falla simultánea. Este indicador debe tener metas y objetivos de efectividad muy altos dado que, por lo general, las fallas simultáneas tienen consecuencias en materia de seguridad.

La "Tasa de fallos ocultos" (ver figura 12.3.3), es un indicador de situación y permite ajustar el tiempo medio entre fallas estimado inicialmente para el dispositivo de seguridad ($MTBF_{ds}$). Se trata de un indicador que puede aplicarse para uno o más dispositivos iguales en la medida que el contexto operativo de todos los dispositivos sea lo suficientemente similar como para que la hipótesis tenga validez.

Supóngase que en una Planta hay instalados 50 detectores de humo todos sometidos a rutinas de cheque funcional cada año. Si al cabo de un año sólo en una oportunidad uno de los detectores se encontró en estado de falla, entonces podría decirse que este tipo de detectores tiene un período promedio de falla en demanda de 50 años, *en la medida que el contexto operativo de todos los dispositivos sea exactamente el mismo.*

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Gestión de Órdenes de Trabajo (OT)	I/S	S	B	Porcentaje de OT "x" por "y"	Porcentaje de OT en algún estado "x" discriminadas por alguna condición particular "y". *Ej.: Porcentaje de OT "En Ejecución por Sector", "Cerradas por Taller", etc.*	%	$OT_{"x/y"} = \frac{\Sigma OT_{"x/y"}}{\Sigma OT_{"x"}}$	$\Sigma OT_{"x/y"}$: Cantidad de OT en estado "x" que satisfagan la condición "y". $\Sigma OT_{"x"}$: Cantidad total de OT en estado "x".	El subíndice "x" puede referirse a Órdenes: *abiertas, en ejecución, cerradas*, etc. "y" es la condición de selección.
	I/S	S	B	Porcentaje de OT "x"	Relación entre la cantidad de OT en algún estado o condición "x", y el total de OT. *Ej.: Porcentaje de OT "Cerradas", "Porcentaje de OT Preventicas", etc.*	%	$OT_{"x"} = \frac{\Sigma OT_{"x"}}{\Sigma OT}$	$\Sigma OT_{"x"}$: Cantidad de OT en estado o condición "x". ΣOT: Cantidad total de OT.	El subíndice "x" puede referirse a Órdenes; *abiertas, en ejecución, cerradas, correctivas, predictivas, preventivas,* etc. Todas las OT deben referirse al mismo período de análisis.
	I	E	B	Cumplimiento de OT programadas	Relación entre las OT cerradas de un total definido de abiertas (todas programadas).	%	$C_{OT(P)} = \frac{\Sigma OT_{(P)\,Cerradas}}{\Sigma OT_{(P)\,Abiertas} + \Sigma OT_{(P)\,Cerradas}}$	$\Sigma OT_{(P)Cerradas}$: Cantidad OT programadas y cerradas. $\Sigma OT_{(P)Abiertas}$: Cantidad OT programadas y abiertas.	Ambos grupos de Órdenes (abiertas y cerradas) son del tipo **programadas** y deben referirse al mismo período de análisis. El estado de las OT se considera al momento de calcular el indicador.
	I/S	E	M	Desvío promedio de cierre de OT	Promedio de las diferencias entre el tiempo real de cierre de las OT y el tiempo previsto (teórico) de cierre, para el mismo grupo de OT.	Días	$Desv_{OT(P)} = \frac{\Sigma(Fecha_{Real\ Cierre} - Fecha_{Teórica\ Cierre})_{OT(P)_i}}{\Sigma OT(P)_{Cerradas}}$	$Fecha_{Real\ Cierre}$: Fecha real de cierre de las $OT_{(P)i}$. $Fecha_{Teórica\ Cierre}$: Fecha prevista de cierre de las $OT_{(P)i}$. $\Sigma OT_{(P)Cerrada}$: Cantidad de OT cerradas.	Considerar siempre el mismo período de análisis e intervalos temporales de medición para todas las OT. Las Órdenes son todas del tipo **programadas**. Permite medir los atrasos respecto a las fechas previstas de ejecución.
	I	EE	M	Eficiencia cumplimiento de OT programadas	Promedio de las diferencias entre las horas hombre realmente consumidas para cumplir las OT, y su equivalente previsto.	%	$Efic_{OT(P)} = 1 - \frac{\Sigma(HH_{Real} - HH_{Teórica})_{OT(P)_i}}{\Sigma(HH_{Teórica})_{OT(P)_i}}$	HH_{Real} : Horas hombre que fueron necesarias para cumplir con las $OT_{(P)i}$. $HH_{Teórico}$: Horas hombre previstas para cumplir con las $OT_{(P)i}$.	Ambos grupos de Órdenes (abiertas y cerradas) son del tipo **programadas** y deben referirse al mismo período de análisis. Permite evaluar los desvíos entre los tiempos previstos y los reales.
	I	EEE	M	Efectividad cumplimiento de OT programadas	Relaciona la eficacia con la eficiencia, en el cumplimiento de las OT programadas.	%	$Efec_{OT(P)} = C_{OT(P)} \cdot Efic_{OT(P)}$	$C_{OT(P)}$: Cumplimiento de $OT_{(P)}$. $Efic_{OT(P)}$: Eficiencia cumplimiento de $OT_{(P)}$.	Ambos grupos de Órdenes (abiertas y cerradas) son del tipo **programadas** y deben referirse al mismo período de análisis.
	I/S	E	B	Cumplimiento de OT correctivas	Relación entre las OT cerradas de un total definido de abiertas (todas correctivas).	%	$C_{OT(C)} = \frac{\Sigma OT(C)_{Cerradas}}{\Sigma OT(C)_{Abiertas} + \Sigma OT(C)_{Cerradas}}$	$\Sigma OT_{(C)Cerradas}$: Cantidad OT correctivas cerradas. $\Sigma OT_{(C)Abiertas}$: Cantidad OT correctivas abiertas.	Ambos grupos de Órdenes (abiertas y cerradas) son del tipo **correctivas** y referidas al mismo período de análisis. Definir un tiempo límite de cierre.
	I	E	M	Backlog de OT "x"	Indica el esfuerzo necesario para cumplir con el trabajo atrasado. *Ej.: "Días de atraso en OT Correctivas".*	Días	$Backlog_{OT(C)} = \frac{\Sigma HH_{OT(C)\ Atrasadas}}{HH_{Diarias}}$	$\Sigma HH_{OT(C)Atrasadas}$: Cantidad total de horas que requeriría cumplir con todas las OT correctivas atrasadas. $HH_{Diarias}$: Cantidad de horas disponibles y efectivas de trabajo.	Puede aplicarse para cualquier condición de OT. (correctivas, preventivas, predictivas, etc.).
	I	E	A	Índice de Repetición de OT correctivas	Evalúa la eficacia en la resolución definitiva de eventos imprevistos.	%	$REP_{OT(C)} = \frac{\Sigma OT(C)_{Cerradas} - \Sigma OT_{(C)Re\text{-}abiertas}}{\Sigma OT_{(C)\,Cerradas}}$	$\Sigma OT_{(C)Cerradas}$: Cantidad OT correctivas cerradas. $\Sigma OT_{(C)Re\text{-}abiertas}$: Cantidad OT correctivas re-abiertas.	Ambos grupos de Órdenes (cerradas y re-abiertas) son del tipo **correctivas** y deben referirse al mismo período de análisis. Estipular un tiempo de reapertura por debajo del cual la OT debe considerarse reabierta.
	I/S	E	B	Atención de pedidos	Indica la velocidad de respuesta a los Pedidos o Avisos de reparación solicitados por Producción.	Días	$R_{Pedidos} = \frac{\Sigma(F.Cumpl._{Pedido} - F.Solic._{Pedido})_i}{\Sigma(Pedidos_{Solicitados})_i}$	$F.Cumpl._{Pedido}$: Fecha cumplimiento del pedido. $F.Solic._{Pedido}$: Fecha solicitud del pedido de trabajo. $\Sigma(Pedidos_{Solicitados})_i$: Cantidad de pedidos solicitados.	Se trata de Pedidos de Trabajos o Avisos de Reparaciones solicitados por el departamento de Producción.

Figura 12.3.2
Indicadores de Gestión de Órdenes de Trabajo.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Mantenimiento	I	S	B	Proporción de Mantenimiento Predictivo	Relación entre alguna variable "x" de las rutinas de mantenimiento predictivo (a condición), y su equivalente del total de rutinas de mantenimiento. *Ej.: Porcentaje horas programadas de predictivo del total de horas programadas.*	%	$P_{Predictivo} = \frac{\Sigma Horas_{Predictivo}}{\Sigma Horas_{Totales}}$	$\Sigma Horas_{Predictivo}$: Cantidad de horas hombre programadas de Mantenimiento Predictivo. $\Sigma Horas_{Totales}$: Cantidad total de horas hombre programadas.	Considerar para el numerador y el denominador el mismo alcance (Planta, unidad de negocio, sector, etc.) y el mismo período de análisis.
	I	E	A	Eficacia del Mantenimiento Predictivo	Proporción de fallas sintomáticas que se convirtieron en fallas funcionales (para el mismo modo de falla).	%	$E_{Predictivo} = \frac{\Sigma F._{Sintomáticos} - \Sigma F._{Funcionales}}{\Sigma F._{Sintomáticos}}$	$\Sigma F._{Sintomáticos}$: Cantidad de fallas sintomáticas. $\Sigma F._{Funcionales}$: Cantidad de fallas funcionales.	Para a un mismo equipo y para el modo de falla correspondiente a la inspección a condición. Requiere un registro de historial muy detallado.
	I	EE	A	Eficiencia del Mantenimiento Predictivo	Relación entre alguna variable "x" de una rutina a condición y la misma variable presupuestada.	%	$EE_{Predictivo} = 1 - \frac{"X"_{Real} - "X"_{Presupuesto}}{"X"_{Presupuesto}}$	"X": Variable asociada a, gastos, tiempo, horas hombre, recursos, etc.	Idem anterior. Estimar para un período de tiempo suficientemente representativo.
	I	EEE	A	Efectividad del Mantenimiento Predictivo	Efectividad de la tarea basada en condición (Proactivo / Predictivo).	%	$EEE_{Predictivo} = E_{Predictivo} \cdot EE_{Predictivo}$	$E_{Predictivo}$: Eficacia de la tarea a condición. $EE_{Predictivo}$: Eficiencia de la tarea a condición.	Idem anterior.
	I	S	B	Proporción de Mantenimiento Preventivo	Relación entre alguna variable "x" de las rutinas de mantenimiento preventivo, y su equivalente del total de rutinas de mantenimiento. *Ej.: Porcentaje horas programadas de preventivo del total de horas programadas.*	%	$P_{Preventivo} = \frac{\Sigma Horas_{Preventivo}}{\Sigma Horas_{Totales}}$	$\Sigma Horas_{Preventivo}$: Cantidad de horas hombre programadas de Mantenimiento Preventivo. $\Sigma Horas_{Totales}$: Cantidad total de horas hombre programadas.	Considerar para el numerador y el denominador el mismo alcance (Planta, unidad de negocio, sector, etc.) y el mismo período de análisis.
	I	E	A	Eficacia del Mantenimiento Preventivo	Proporción de fallas imprevistas, aún con la aplicación de rutinas de mantenimiento preventivo, para un mismo modo de falla.	%	$E_{Preventivo} = \frac{\Sigma R_{Preventivo} - \Sigma F_{Funcionales}}{\Sigma R_{Preventivo}}$	$\Sigma R_{Preventivo}$: Cantidad de intervenciones (restauración ó sustitución) preventivas. $\Sigma F_{Funcionales}$: Cantidad de fallas imprevistas.	Para un mismo equipo y para el mismo modo de falla que se pretende evitar con la rutina de mantenimiento preventivo. Requiere un registro de historial muy detallado.
	I	EE	A	Eficiencia del Mantenimiento Preventivo	Relación entre alguna variable "x" de una intervención preventiva y la misma variable presupuestada.	%	$EE_{Preventivo} = 1 - \frac{"X"_{Real} - "X"_{Presupuesto}}{"X"_{Presupuesto}}$	"X": Variable asociada a, gastos, tiempo, horas hombre, recursos, etc.	Idem anterior. Estimar para un período de tiempo suficientemente representativo.
	I	EEE	A	Efectividad del Mantenimiento Preventivo	Efectividad de la tarea de restauración o sustitución cíclica.	%	$EEE_{Preventivo} = E_{Preventivo} \cdot EE_{Preventivo}$	$E_{Preventivo}$: Eficacia de la tarea preventiva. $EE_{Preventivo}$: Eficiencia de la tarea preventiva.	Idem anterior.
	I	S	B	Proporción de Mantenimiento Detectivo	Relación entre alguna variable "x" de las tareas de mantenimiento detectivo, y su equivalente del total de rutinas de mantenimiento. *Ej.: Porcentaje de horas programadas de detectivo del total de horas programadas.*	%	$P_{Detectivo} = \frac{\Sigma Horas_{Detectivo}}{\Sigma Horas_{Totales}}$	$\Sigma Horas_{Detectivo}$: Cantidad de horas hombre programadas de Mantenimiento Detectivo. $\Sigma Horas_{Totales}$: Cantidad total de horas hombre programadas.	Considerar para el numerador y el denominador el mismo alcance (Planta, unidad de negocio, sector, etc.) y el mismo período de análisis.
	I	E	A	Eficacia del Mantenimiento Detectivo	Proporción de fallas simultáneas con relación a una tarea de Mantenimiento Detectivo efectuada sobre el dispositivo redundante o de protección.	%	$E_{Detectivo} = \frac{\Sigma R_{Detectivo} - \Sigma F_{Simultáneas}}{\Sigma R_{Detectivo}}$	$\Sigma R_{Detectivo}$: Cantidad de intervenciones detectivas (búsqueda de fallos ocultos). $\Sigma F_{SimultáneAs}$: Cantidad de fallas simultáneas ocurridas.	Para un mismo dispositivo (redundante o de protección), y para el mismo modo de falla sobre dicho dispositivo. Requiere un registro de historial muy detallado.
	I	EE	A	Eficiencia del Mantenimiento Detectivo	Relación entre alguna variable "x" de la tarea de búsqueda de fallos ocultos y la misma variable presupuestada.	%	$EE_{Detectivo} = 1 - \frac{"X"_{Real} - "X"_{Presupuesto}}{"X"_{Presupuesto}}$	"X": Variable asociada a, gastos, tiempo, horas hombre, recursos, etc.	Idem anterior. Estimar para un período de tiempo suficientemente representativo.

Figura 12.3.3
Indicadores de Mantenimiento.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	**Descripción**	**UN**	**Fórmula**	**Variables**	**Comentarios**
Mantenimiento	I	EEE	A	Efectividad del Mantenimiento Detectivo	Efectividad de la tarea de búsqueda de fallos ocultos.	%	$EEE_{Detectivo} = E_{Detectivo} \cdot EE_{Detectivo}$	$E_{Detectivo}$: Eficacia de la tarea de búsqueda de fallos ocultos. $EE_{Detectivo}$: Eficiencia de la tarea de búsqueda de fallos ocultos.	Idem anterior.
	I	S	M	Tasa de fallos ocultos	Tiempo medio entre fallas de un dispositivo redundante o de protección. Permite estimar u optimizar el $MTBF_{ds}$ para el cálculo o ajuste de las frecuencias detectivas.	%	$MTBF_{ds} = \frac{\Sigma Horas_{Operación\ i}}{\Sigma Fallos_i}$	$\Sigma Horas_{Operación\ i}$: Tiempo de actuación (presto a funcionar) del dispositivo redundante o de protección i. $\Sigma Fallos_i$: Cantidad de veces que las rutinas detectivas encontraron en estado de "falla" al dispositivo i.	Para aplicar esta ecuación a más de un dispositivo, debe asegurarse la misma clase (tipo) de dispositivo y exactamente el mismo modo de falla y contexto operativo.
	I	S	B	Acciones Reactivas - Pro-activas	Relación entre alguna variable "x" de las acciones reactivas con relación a la misma variable de acciones pro-activas. *Ej.: Horas hombre en tareas de mantenimiento correctivo con respecto a las horas hombre de mantenimiento preventivo.*	%	$R_{RP} = \frac{\Sigma HH_{Correctivo}}{\Sigma HH_{Preventivo}}$	$\Sigma HH_{Correctivo}$: Cantidad de horas hombre en Mantenimiento Correctivo. $\Sigma HH_{Preventivo}$: Cantidad de horas hombre en Mantenimiento Preventivo.	Es un indicador de situación y su resultado no significa, por sí solo, un mal o buen desempeño del departamento de Mantenimiento.
	I	S	B	Consumo de Lubricantes	Cantidad de un lubricante "x" consumido en un equipo o conjunto de equipos.	lts	$C_{Lubricante} = \Sigma Consumo_i$	$\Sigma Consumo_i$: Suma de los consumos de un tipo de lubricante en los distintos equipos i.	Válido para uno o más tipos de lubricantes.
	I	E	B	Eficacia de Calibraciones	Proporción de desvíos de una variable crítica de control con respecto al Plan de Calibraciones de la misma variable.	%	$E_{Calibraciones} = \frac{\Sigma Rut._{Calibración} - \Sigma Desvíos}{\Sigma Rut._{Calibración}}$	$\Sigma Rut_{Calibración}$: Cantidad de calibraciones sobre una misma variable de control. ΣDesvíos: Cantidad de desvíos de la variable crítica de control.	Para una misma varible crítica de control, y para el mismo modo de falla capaz de alterar dicha variable. Requiere un registro de historial muy detallado.
	I	S	B	Gravedad de Fallos	Promedio del tiempo perdido debido a fallos imprevistos (impacto promedio).	Horas	$T_{Perdido} = \frac{\Sigma Horas_{Detenciones\ i}}{\Sigma Fallos_i}$	$\Sigma Horas_{Detenciones\ i}$: Suma total de tiempo por detenciones imprevistas. $\Sigma Fallos_i$: Cantidad de fallos.	Para un equipo o conjunto de equipos. Establecer un período de análisis.
	I	S	B	Gravedad de Fallos	Proporción del tiempo perdido por fallos imprevistos, en relación al tiempo de operación de un equipo.	%	$G_{Fallos} = \frac{\Sigma Horas_{Detenciones}}{\Sigma Tiempo_{Operación}}$	$\Sigma Horas_{Detenciones}$: Tiempo por detenciones imprevistas del equipo. $\Sigma Tiempo_{Operación}$: Tiempo de operación del activo.	Indicador aplicable a un activo productivo (línea de producción, sistema, equipo, etc.).
	I	E	M	Cumplimiento del Plan de Mantenimiento	Grado de cumplimiento del Plan de Mantenimiento.	%	$ICM = \frac{\Sigma Rutinas_{Cumplidas}}{\Sigma Rutinas_{Programadas}}$	$\Sigma Rutinas_{Cumplidas}$: Cantidad de rutinas de Mantenimiento programadas y cumplidas. $\Sigma Rutinas_{Programadas}$: Cantidad de rutinas programadas.	Las rutinas pro-activas programadas incluyen los planes de mantenimiento, predictivos, preventivos, detectivos, calibraciones, etc. Podría, en tal caso, plantearse este indicador abierto por cada tipo de estrategia.

Figura 12.3.3
Indicadores de Mantenimiento (continuación).

12.3.4 Gestión de Repuestos (Inventario)

El primer indicador que muestra la planilla de la figura 12.3.4 - "Desvío porcentual de códigos de stock" - permite evaluar las diferencias en el stock físico del Almacén de repuestos con respecto a lo informado por el sistema informático de control de stock (SIS). Sin embargo, nada dice de la gravedad de estos desvíos; sólo indica la cantidad de códigos desviados.

Para tener en cuenta la gravedad de los desvíos se usa el segundo indicador que considera el monto de las diferencias halladas ("Desvío monetario de unidades en stock"). Obsérvese que los ratios del primer indicador deben complementarse con los del segundo, pues, aún con diferencias porcentuales los valores monetarios de los desvíos pueden no ser tan elevados. Suele ser éste el caso de desvíos porcentuales en códigos de ferretería de uso genérico donde, por lo general, los montos desviados son de poca magnitud.

Los indicadores "Índice de administración de existencias y Efectividad de la administración", se encuentran de alguna manera relacionados. Obsérvese que podría mejorarse fácilmente el primero de ellos reduciendo drásticamente la dotación asignada a las tareas de administración física de ítems. Sin embargo, es de esperar que tal reducción afecte al segundo indicador dado que aumentarán los desvíos económicos en las auditorias de inventario.

Evaluar las pérdidas ocasionadas por los retrasos o demoras en la entrega de repuestos, no es sencillo. "Pérdidas por demora de materiales" es un indicador de alta complejidad porque es difícil discernir cuáles son los eventos (falta de repuestos) que realmente produjeron pérdidas productivas cuantificables.

12.3.5 Gestión de Mejoras

Este paquete de indicadores es mayoritariamente usado a nivel Gerencial o por Ingeniería de Mantenimiento. Tiene en cuenta aspectos estratégicos de negocio.

"Ahorros por Proyectos" es un indicador muy preciso en lo que respecta a la efectividad de los proyectos de mejora emprendidos. Por lo general, los beneficios se ven en la reducción de gastos de mantenimiento o en el aumento de confiabilidad y disponibilidad.

Asimismo, se presentan algunos indicadores específicos que evalúan los beneficios de aplicar herramientas o metodologías de mejora como el RCM y el TPM.

12.3.6 Personal

Los indicadores referidos a este grupo deben elaborarse e implementarse conjuntamente entre los responsables de Mantenimiento y Recursos Humanos. Un indicador que se destaca es "FTE" (Full Total Equivalent). Su aplicación debe ser muy cuidadosa porque errores de apreciación pueden derivar en conclusiones equivocadas.

Medir el desempeño de los colaboradores es difícil e incómodo. Las mejores evaluaciones se obtienen de observar períodos extensos (mayores al año). Gran parte del comportamiento de una persona depende de su estado de ánimo y motivación.

En la tabla de la figura 12.3.6 se observan indicadores de antigüedad, ausentismo, grado de aprovechamiento, capacitación, tasa personal de accidentes, etc.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Gestión de Repuestos (Inventario)	I/S	E	B	Desvío porcentual de códigos en stock	Indica el porcentaje de códigos encontrados con desvíos de stock entre el SGS y la "estantería".	%	$Desv_{Códigos} = \frac{\Sigma Códigos_{Desviados}}{\Sigma Códigos_{Auditados}}$	$\Sigma Códigos_{Auditados}$: Cantidad de códigos auditados. $\Sigma Códigos_{Desviados}$: Cantidad de códigos con desvío de stock del total auditados.	Antes de la auditoría definir el universo de códigos a verificar. Si las auditorias son periódicas seleccionar distinto universo para cada una. Recordar que un código es un tipo de Repuesto o Material.
	G/I	E	B	Desvío monetario de unidades en stock	Indica el porcentaje (absoluto) del monto desviado de las unidades auditadas con respecto al monto total del universo predefinido.	%	$Desv\$_{UN} = \frac{\sum(\lvert UN_{Desviadas\ COD\,i}\rvert \,.\, P_{COD\,i})}{\sum(UN_{Auditadas\ COD\,i} \,.\, P_{COD\,i})}$	$UN_{AuditadasCODi}$: Cantidad de unidades auditadas del código "i". $UN_{Desviados}$: Cantidad de unidades con desvío. P_{CODi} : Precio unitario de cada unidad.	Idem anterior.
	S	EE	B	Índice de administración de existencias	Evalúa la eficiencia administrativa del Almacén físico en función de la cantidad de horas - hombre destinadas para dicha administración.	HH/ Código	$I_{Administración} = \frac{HH_{Administración}}{\Sigma Códigos}$	$HH_{Administración}$: Cantidad de horas hombre destinadas a la administación física de existencias. ΣCódigos: Cantidad de códigos en el Almacén.	Las horas hombre deben ser sólo aquellas directamente destinadas a administrar físicamente el universo de existencias del denominador.
	I	EEE	M	Efectividad de la administración	Indica la cantidad de códigos correctamente administrados por hora hombre de administración.	Códigos/ HH	$Efec_{Adm.} = \frac{(1 - Desv\$_{Ítems})}{I_{Administración}}$	$Desv\$_{Ítems}$: Desvío contable de ítems en stock. $I_{Administración}$: Índice de administración física de existencias.	Ambos indicadores deben referirse al mismo universo de existencias.
	G/I	S	M	Índice de Stock Inmovilizado	Relación entre el stock inmovilizado valorizado y el valor de reposición de los activos.	%	$Stock_{Inmov} = \frac{\sum(Stock_i \,.\, P_i)}{V_r}$	$Stock_i$: Cantidad de ítems o unidades en stock de un mismo código. V_r: Valor de reposición de los activos relacionados con los ítems contabilizados. P_i: Precio unitario de cada ítem.	Los códigos de los ítems deben ser de uso exclusivo en el mismo sector o unidad productiva a la que se le estima el valor de reposición.
	G	EEE	B	Inventario Inmovilizado	Indica el dinero inmovilizado mensualmente para un conjunto de ítems.	$ mes	$Inv._{Inmovilizado} = \sum \frac{(Stock_i \,.\, P_i)^2}{D_{mensual\ i}}$	$Stock_i$: Cantidad de unidades en stock de un mismo código. Pi: Precio unitario de cada ítem. $D_{mensual\ i}$: Demanda mensual promedio del ítem i	Este indicador tiene en cuenta el tiempo de inmovilización.
	G	S	B	Índice de Consumo	Relación entre el consumo valorizado de repuestos y el valor de reposición de los activos.	%	$I_{Consumo} = \frac{GT_{MAT}}{V_r}$	GT_{MAT}: Gasto total en materiales y repuestos. V_r: Valor de reposición de los activos relacionados con los ítems consumidos.	Los códigos de los ítems consumidos deben ser de uso exclusivo en el mismo sector o unidad productiva a la que se le estima el valor de reposición.
	I	S	B	Índice de Rotación	Relación entre el consumo valorizado de repuestos y el stock inmovilizado valorizado.	%	$I_{Rotación} = \frac{GT_{MAT}}{\sum(Stock_i \,.\, P_i)}$	GT_{MAT} : Gasto total en repuestos y materiales. $Stock_i$: Cantidad de unidades en stock de un mismo código. Pi: Precio unitario de cada ítem.	Los códigos de los ítems consumidos deben pertenecer al mismo universo de materiales.
	S	E	B	Cumplimiento Despacho de Vales	Cantidad de vales despachados a tiempo con relación al total de vales emitidos.	%	$D_{Vales} = \frac{\Sigma Vales_{Despachados}}{\Sigma Vales_{Emitidos}}$	$\Sigma Vales_{Despachados}$: Cantidad de vales despachados. $\Sigma Vales_{Emitidos}$: Cantidad total de vales emitidos.	Los vales despachados deben cumplir la condición de ser despachos antes del tiempo estimado de despacho.
	I	E	B	Cumplimiento de Compras	Mide el nivel de cumplimiento en los pedidos de compra.	%	$Nivel_{Cumplimiento} = 1 - \frac{\Sigma Pedidos_{Demorados}}{\Sigma Pedidos}$	$\Sigma Pedidos_{Demorados}$: Cantidad de pedidos demorados. ΣPedidos: Cantidad total de pedidos.	Generalmente se aplica a periodos mensuales.
	I	S	A	Pérdidas por demora de materiales	Mide la pérdida económica media causada por retrasos en la entrega de materiales (repuestos) solicitados a través de vales.	$/Vale	$Pérdidas = \frac{\Sigma Costo_{Demora\ de\ Materiales}}{\Sigma Vales_{Retrasados}}$	$\Sigma Costo_{Demora\ de\ Materiales}$: Suma de los costos (pérdidas) causados por la falta de repuestos. $\Sigma Vales_{Retrasados}$: Cantidad de vales despachos con retraso que causaron perjuicio económico.	Las pérdidas causadas por la falta de repuestos, deben ser debidamente verificadas.
	I	S	B	Códigos bajo control de stock	Relación entre los códigos que son ítems de stock (controlados por el SGS) y el total de repuestos (controlados + no controlados).	%	$I_{C.\ de\ Stock} = \frac{\Sigma Códigos_{Bajo\ Control}}{\Sigma Códigos}$	$\Sigma Códigos_{Bajo\ Control}$: Cantidad de códigos bajo control de stock en el SGS. $\Sigma_{Códigos}$: Cantidad total de códigos (controlados + no controlados).	Los códigos considerados bajo control de stock son aquellos que se encuentran parametrizados (stock mínimo, punto de pedido, etc.) en el sistema de gestión de stocks (SGS).
	G/I	S	M	Índice de Compras Directas	Porcentaje de compras directas con relación al total de compras de Mantenimiento.	%	$I_{C.\ Directas} = \frac{\Sigma Montos_{F.\ c/OC}}{\Sigma Montos_{F.\ s/OC} + \Sigma Montos_{F.\ c/OC}}$	$\Sigma Montos_{Facturas\ s/OC}$: Monto total de facturas pagadas sin mediar una Orden de Compra. $\Sigma Montos_{Facturas\ c/OC}$: Monto total de facturas pagadas a través de Ordenes de Compra.	Deben estipularse intervalos definidos de análisis, generalmente mensuales.

Figura 12.3.4
Indicadores de Gestión de Repuestos (Inventario).

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Gestión de Mejoras	G/I	S	B	Optimización de Estrategias de Mantenimiento	Porcentaje de activos (equipos, líneas, sistemas, procesos, etc.) con estrategias de Mantenimiento optimizadas. *Ej.: "Equipos analizados con RCM", "Líneas de producción bajo TPM, etc.*	%	$G_{Optimización} = \frac{\Sigma Activos_{Optimizados}}{\Sigma Activos_{A\ optimizar}}$	$\Sigma Activos_{Optimizados}$: Cantidad de activos analizados y mejoradas sus estrategias. $\Sigma Activos_{A\ Optimizar}$: Cantidad total de activos a los que es necesario mejorarles sus estrategias de mantenimiento.	El plan de mejoras deberá indicar los activos a los que vale la pena mejorarles sus estrategias de mantenimiento. Un indicador de avance de mejoras permite evaluar la relación entre lo hecho y lo pendiente (de acuerdo al plan).
	G/I	E	B	Cumplimiento de Proyectos (RCM / RCA / TPM / Six Sigma / Análisis P-M / etc.)	Muestra el grado de cumplimiento de los grupos de trabajo abocados a proyectos de mejora. *Ej.: "Análisis RCM finalizados con respecto al plan", "Cantidad de análisis RCA estudiados e implementados del total de planificados para el año", etc.*	%	$E_{Mejoras} = \frac{\Sigma Proyectos_{Cumplidos}}{\Sigma Proyectos_{Planificados}}$	$\Sigma Proyectos_{Cumplidos}$: Cantidad de proyectos finalizados o cumplidos. $\Sigma Proyectos_{Planificados}$: Cantidad total de proyectos planificados para ser optimizados con la disciplina escogida.	Deben estipularse plazos de cumplimiento razonables y acordados con los responsables de cada proyecto. Permite evaluar el grado de cumplimiento de los proyectos planificados. Es conveniente plantear un indicador para cada tipo de proyecto.
	G/I	EE	B	Eficiencia en el cumplimiento de proyectos	Mide la eficiencia demostrada por los grupos de trabajo durante la ejecución de proyectos de mejora.	%	$EE_{Mejoras} = 1 - \frac{\Sigma T_{Real} - \Sigma T_{Planificado}}{\Sigma T_{Planificado}}$	ΣT_{Real}: Tiempo (o cantidad de reuniones) utilizado para concluir los proyectos de mejora u optimización. $\Sigma T_{Planificado}$: Tiempo (o cantidad de reuniones) planificado para concluir los proyectos de mejora u optimización.	Deben estipularse plazos de cumplimiento razonables y acordados con los responsables de cada proyecto. Permite evaluar la eficiencia con respecto al tiempo planificado. Es conveniente plantear un indicador para cada tipo de proyecto.
	I	EE	B	Eficiencia de los grupo de análisis RCM	Mide la eficiencia analítica o el rendimiento de los grupos de trabajo RCM.	Modos de Falla/ Hora	$EE_{RCM} = \frac{\Sigma Modos\ de\ Falla_{Analizados}}{\Sigma Horas_{D\ e\ reuniones}}$	$\Sigma Modos\ de\ Falla_{Analizados}$: Cantidad de modos de falla analizados por el grupo de trabajo. $\Sigma Horas_{De\ reunión}$: Cantidad de horas de las reuniones RCM.	Este indicador depende del grado de pericia de los integrantes del grupo de trabajo; en ningún caso refleja la calidad de los análisis. Puede aplicarse para uno o más análisis RCM; pero siempre para el mismo grupo de trabajo.
	G/I	E	M	Ahorros por Proyectos (RCM / RCA / TPM / Six Sigma / Análisis P-M / etc.)	Muestra el impacto de aplicar alguna disciplina de mejora con respecto a la reducción de gastos, incremento de disponibilidad u otra variable del proceso.	%	$Ahorro_{Proyectos} = 1 - \frac{G_{TM\ (con\ mejora)}}{G_{TM\ (sin\ mejora)}}$	$G_{TM(con\ mejora)}$: Gasto de mantenimiento después de implementar las mejoras. $G_{TM(sin\ mejora)}$: Gasto de mantenimiento antes de implementar las mejoras.	La ecuación se refiere a los gastos totales de mantenimiento (incluyendo los necesarios para estudiar e implementar las mejoras). Puede aplicarse individualmente para cada tipo de gasto (repuestos, servicios o mano de obra).
	I	E	B	Cierre de ADF's	Análisis de fallos resueltos o cerrados del total de abiertos o generados, para un período de tiempo definido.	%	$Cierre_{ADF} = \frac{\Sigma ADF_{Cerrados}}{\Sigma ADF_{Abiertos}}$	$\Sigma ADF_{Cerrados}$: Cantidad de ADF's abiertos y cerrados. $\Sigma ADF_{Abiertos}$: Cantidad de ADF's abiertos.	Muestra el grado de cumplimiento para los análisis de fallos (ADF's). Estipular un tiempo razonable de cierre a partir del cual el ADF se considera vencido.
	G/I	E	B	Avance de despliegues TPM	Indica el avance porcentual alcanzado por los despliegues de la metodología TPM.	%	$Avance_{TPM} = \frac{\Sigma Pasos_{Aprobados}}{\Sigma Pasos_{Planificados}}$	$\Sigma Pasos_{Aprobados}$: Cantidad de Pasos TPM aprobados. $\Sigma Pasos_{Planificados}$: Cantidad de Pasos TPM planificados.	Puede ser considerado un indicador de situación o de eficacia. Permite evaluar el grado de avance en la implementación de los Pasos de un Pilar TPM.

Figura 12.3.5
Indicadores de Gestión de Mejoras.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	**Descripción**	**UN**	**Fórmula**	**Variables**	**Comentarios**
Personal	G/I	S	B	Antigüedad	Edad promedio de un determinado grupo de colaboradores.	Años	$\text{Antigüedad} = \frac{\Sigma \text{Edades}}{\Sigma \text{Colaboradores}}$	ΣEdades: Suma de las edades. ΣColaboradores: Cantidad de colaboradores.	Puede aplicarse a cualquier grupo de personas, sólo que las edades computadas deben corresponder a los mismos colaboradores.
	G/I	S	B	Índice de Antigüedad	Indica el porcentaje de colaboradores comprendidos dentro de cierto rango de edades, con respecto al total de empleados. *Ej.: "Porcentaje de colaboradores entre los 25 y 30 años".*	%	$I_{\text{Antig.}(x-y)} = \frac{\Sigma \text{Colaboradores}_{(x-y)}}{\Sigma \text{Colaboradores}}$	ΣColaboradores(x-y): Cantidad de colaboradores cuyas edades van desde los "x" a los "y" años. ΣColaboradores: Cantidad total de colaboradores.	Los rangos de edades pueden seleccionarse de acuerdo a la cantidad de colaboradores. El subconjunto de colaboradores (x-y) debe estar incluido completamente en el conjunto de colaboradores.
	G	S	B	Span of Control	Mide el Span of Control (SOC) medio de un nivel o grupo de liderazgo (n). *Ej.: "SOC del nivel Supervisión".*	Cantidad/ Nivel (n)	$SOC_{\text{medio}(n)} = \frac{\Sigma \text{Colaboradores}_{(n-1)}}{\Sigma \text{Colaboradores}_{(n)}}$	ΣColaboradores(n-1): Cantidad de colaboradores pertenecientes al nivel (n-1) de la estructura. ΣColaboradores(n): Cantidad de colaboradores pertenecientes al nivel (n) de la estructura.	Sólo indica un promedio para los colaboradores pertenecientes al nivel (n) de la estructura jerárquica.
	G	S	B	Relación MOI / MOD	Indica la relación porcentual entre la mano de obra directamente vinculada a la ejecución del mantenimiento, con aquella destinada a tareas de gestión o administración.	%	$R_{\text{MOI/MOD}} = \frac{\Sigma \text{Horas}_{\text{MOI}}}{\Sigma \text{Horas}_{\text{MOI}} + \Sigma \text{Horas}_{\text{MOD}}}$	$\Sigma\text{Horas}_{\text{MOI}}$: Cantidad de horas hombre por mano de obra indirecta (gestión). $\Sigma\text{Horas}_{\text{MOD}}$: Cantidad de horas hombre por mano de obra directa (ejecución).	Las horas de mano de obra directa (MOD) deben incluir aquellas realizadas en horas extras.
	G/I	S	B	Porcentaje de Dotación por Sector	Indica el porcentaje de colaboradores de cierto sector, taller, etc., con respecto al total de colaboradores. *Ej.: "Porcentaje de colaboradores en Mecánica"*	%	$I_{\text{Sector}} = \frac{\Sigma \text{Colaboradores}_{\text{Sector "x"}}}{\Sigma \text{Colaboradores}}$	$\Sigma\text{Colaboradores}_{\text{Sector "x"}}$: Cantidad de colaboradores del sector "x". ΣColaboradores: Cantidad total de colaboradores.	
	G	EE	M	Fuerza Laboral Equivalente	Cantidad de personal equivalente y directamente afectado a la Ejecución / Supervisión del Mantenimiento. Se conoce como FTE (Full Total Equivalent).	Cantidad	$\text{FTE} = \Sigma P._{\text{Propio}} + \frac{\Sigma \text{Monto}_{\text{Terceros}}}{\text{Costo}_{\text{P. propio}}}$	$\Sigma P._{\text{Propio}}$: Cantidad de colaboradores afectados a tareas de mantenimiento. $\Sigma\text{Monto}_{\text{Terceros}}$: Importe total facturado por los servicios de terceros para suplir la falta de mano de obra o las tareas de especialización técnica. $\text{Costo}_{\text{P. propio}}$: Costo medio de un colaborador de mantenimiento.	El numerador y denominador del segundo término deben referirse al mismo período de tiempo. Si el monto por servicios de terceros corresponde a un mes de facturación, el valor del denominador debe ser el valor mensual promedio de lo que le cuesta a la compañía un colaborador directamente afectado a tareas de mantenimiento.
	G	E	M	Grado de Aprovechamiento	Mide el grado de aprovechamiento de los trabajadores, o su factor de utilización.	%	$G_{\text{Aprov.}} = \frac{\Sigma \text{HH}_{\text{OT}}}{\Sigma \text{HH}_{\text{Reloj}}}$	$\Sigma\text{HH}_{\text{OT}}$: Suma de horas hombre cargadas en las Órdenes de Trabajo cumplidas. $\Sigma\text{HH}_{\text{Reloj}}$: Cantidad total de horas hombre contabilizadas en RRHH.	Las horas hombre contabilizadas son las abonas por la compañía en concepto salarial. Las horas cargadas en las OT son las insumidas para realizar los trabajos. El período de tiempo analizado y el grupo de colaboradores, deben ser los mismos para el numerador y el denominador.
	G/I	S	B	Índice de Capacitación	Relaciona las horas anuales en actividades de capacitación con las horas anuales trabajadas por la dotación estable de mantenimiento.	%	$I_{\text{Capacitación}} = \frac{\Sigma \text{Horas}_{\text{Capacitación}}}{\Sigma \text{Horas}_{\text{Trabajadas}}}$	$\Sigma\text{Horas}_{\text{Capacitación}}$: Cantidad de horas anuales destinadas a actividades de capacitación. $\Sigma\text{Horas}_{\text{Trabajadas}}$: Cantidad anual de horas trabajadas.	Normalmente se aplica para intervalos anuales. Debe considerarse el mismo período de análisis para el numerador y el denominador.
	I	S	B	Tasa de Ausentismo	Proporción de horas por ausentismo con relación al total de horas trabajadas.	%	$I_{\text{Ausentismo}} = \frac{\Sigma \text{Horas}_{\text{Ausentismo}}}{\Sigma \text{Horas}_{\text{Trabajadas}}}$	$\Sigma\text{Horas}_{\text{Ausentismo}}$: Cantidad de horas por ausentismo. $\Sigma\text{Horas}_{\text{Trabajadas}}$: Cantidad de horas trabajadas por la dotación de mantenimiento.	Puede aplicarse a intervalos mensuales o anuales. Numerador y denominador deben referirse al mismo grupo de trabajadores.
	G/I	E	B	Tasa Personal de Accidentes	Proporción de días perdidos por accidentes, por millar de horas trabajadas (para cada colaborador).	Días/ Millar de Horas	$D_{\text{Perdidos}} = \frac{\Sigma \text{Días}_{\text{Perdidos}}}{\Sigma \text{Horas}_{\text{Trabajadas}}}$	$\Sigma\text{Días}_{\text{Perdidos}}$: Cantidad de días perdidos por accidentes, para el trabajador. $\Sigma\text{Horas}_{\text{Trabajados}}$: Cantidad de horas trabajados por el mismo trabajador.	Se debe constituir un indicador para cada colaborador.
	I	S	M	Orden y Limpieza del lugar de trabajo.	Evaluación cualitativa de la capacidad del colaborador para mantener su área de trabajo en condiciones adecuadas y seguras.	Sin Valor	Evaluación cualitativa	El área de trabajo se somete a listas de control (check list) mensuales, con la presencia del trabajador involucrado.	Los resultados de la auditoría pueden arrojar cuatro resultados: Mal, Regular, Bien y Muy Bien.

Figura 12.3.6
Indicadores de Personal.

12.3.7 Seguridad y Medio Ambiente

Como lo indica el título, este epígrafe refiere algunos índices usados para medir la eficiencia de las acciones de mantenimiento en relación a la prevención de accidentes y cuidado del medio ambiente. Los principales indicadores son el de "Tasa de accidentes", "Tasa de incidentes" y "Tasa de incidentes ambientales". Algunos de ellos pueden ser útiles para tomar acciones que reduzcan la reiteración de eventos que ponen en riesgo la salud de las personas y el bienestar de la sociedad en su conjunto.

12.3.8 Gestión de Gastos / Costos

Es por pocos discutido el hecho de que el desempeño de la función Mantenimiento se ve reflejado, entre otros, por indicadores financieros y económicos. Tal vez por esta causa, algunos índices de este grupo son los más difundidos y usados.

En el Capítulo anterior pudo advertirse la importancia que tiene el Mantenimiento en las estructuras de costos de las empresas que, aún dependiendo de varios factores, por lo general representa entre el 4 y el 20% del gasto total de operación. Por tanto, resulta imprescindible controlar algunos indicadores vinculados a este segmento.

El seguimiento de los indicadores económicos tiene como principal objetivo responder a las expectativas de los accionistas e inversores. Téngase en cuenta que el cierre del presupuesto no es el único factor que mira un grupo de accionistas. Al igual de lo que sucede con el resto de los indicadores, un reporte de gastos debe reflejar el estado situacional de las principales variables económicas que se desean controlar, comparándolas con períodos anteriores o valores de referencia como el presupuesto.

El indicador "Gasto de Mantenimiento – Nivel de Facturación" suele utilizarse para comparar distintas unidades de negocio (benchmarking). La precaución a tener en cuenta es que el nivel de actividad en Mantenimiento no es directamente proporcional al nivel de actividad productivo. Si el nivel de producción se reduce por merma de facturación (venta) no es de esperar que, ni inmediata ni linealmente, se reduzcan los gastos de mantenimiento. Sólo debe utilizarse este índice para niveles de actividad comparables y estabilizados.

El indicador "Gasto de Mantenimiento – Valor de Reposición" es un indicador de situación interesante para comparar Plantas similares (más bien MUY similares). Es de esperar valores que van del 2 al 7% dependiendo del tipo de industria, región o actividad. Usualmente se aplica al gasto anual aunque puede aplicarse también para períodos más prolongados.

El índice "Gasto de Mantenimiento – Gasto de Producción" es un indicador referencial y se puede aplicar para evaluar la relación entre los recursos fijos y variables de Mantenimiento y Producción (indirectamente).

Los indicadores que relacionan el gasto de mantenimiento con otros índices deben:

- √ Utilizarse para evaluar tendencias propias.
- √ Calcularse en forma anualizada, evitando las estacionalidades.
- √ Tener en cuenta aspectos de contexto como volumen productivo, tecnología, ubicación geográfica de la unidad productiva, etc.
- √ Usarse para hacer estudios de benchmarking sólo si el negocio o los procesos medidos son ciertamente comparables.

La vinculación de los factores de gestión de personal y factores económicos se analizan por medio de un grupo de indicadores como el "Índice de Mano de Obra Propia", "Índice de Horas Extras", "Proporción de Horas Hombre", etc. Tienen la característica de evaluar la estructura de gastos de uno de los factores más importantes del mantenimiento, la mano de obra.

Si bien no se incluye en las planillas de este grupo, puede resultar interesante monitorear anualmente el gasto de ciertas instalaciones o activos representativos del proceso productivo a través de un "Índice de Renovación" calculado como el cociente entre el gasto anual que tiene la instalación existente (GA_E) y el gasto (a valor anualizado) que costaría una nueva instalación (GA_N). Cuando el índice arroja resultados mayores a 1, se volvería conveniente la renovación de la instalación. Ver figura 11.4.2 del Capítulo 11 y sección correspondiente.

Nunca es del todo apropiado medir productividad a nivel humano y mucho menos individual. Sin embargo, podríamos evaluar la productividad de un taller (y la capacidad de planificación de los programadores de mantenimiento) con el "Grado de Aprovechamiento" según puede verse en las planillas de la figura 12.3.8. La productividad de los talleres nunca supera el 70%; lo normal son valores que van del 45 al 60% considerando vacaciones, limpieza, ordenamiento, reuniones, capacitación, etc. Estos indicadores deben aplicarse muy cuidadosamente y con alto grado de compromiso y profesionalismo por parte de los responsables.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	**Descripción**	**UN**	**Fórmula**	**Variables**	**Comentarios**
Seguridad y Medio Ambiente	G	E	B	Tasa de accidentes	Cantidad de días perdidos por accidentes por millar de horas trabajadas (para un grupo de colaboradores).	Días/ Millar de Horas	$D_{Perdidos} = \frac{\Sigma Días_{Perdidos}}{\Sigma Horas_{Trabajadas}}$	$\Sigma Días_{Perdidos}$: Cantidad de días perdidos por accidentes, de un grupo de colaboradores. $\Sigma Horas_{Trabajadas}$: Cantidad de horas trabajados por el mismo grupo de colaboradores.	Se utiliza la unidad "millar de horas" para facilitar la interpretación de los resultados del indicador.
	G	E	B	Tasa de incidentes	Cantidad de incidentes sin pérdida de días por millar de horas trabajadas (para un grupo de colaboradores).	Cantidad/ Millar de Horas	$T_{Incidentes} = \frac{\Sigma Incidentes}{\Sigma Horas_{Trabajadas}}$	ΣIncidentes: Cantidad de incidentes sin pérdida de días para un grupo de colaboradores. $\Sigma Horas_{Trabajadas}$: Cantidad de horas trabajados por el mismo grupo de colaboradores.	Se utiliza la unidad "millar de horas" para facilitar la interpretación de los resultados del indicador.
	G	E	B	Tasa de accidentes por alguna variable "x"	Indica la proporción de días perdidos por accidente con relación a alguna variable de selección "x". *Ej.: "Cantidad de días perdidos por "Sector", "Taller", "Especialidad"*, etc.	Días/ Millar de Horas	$D_{Perdidos\ "x"} = \frac{\Sigma Días_{Perdidos\ "x"}}{\Sigma Horas_{Trabajadas}}$	$\Sigma Días_{Perdidos\ "x"}$: Cantidad de días perdidos por accidentes, de un criterio de selección "x". $\Sigma Horas_{Trabajadas}$: Cantidad de horas trabajadas por el mismo grupo de colaboradores.	Se utiliza la unidad "millar de horas" para facilitar la interpretación de los resultados del indicador.
	G	E	B	Tasa de incidentes ambientales	Cantidad de incidentes ambientales de cierta envergadura por millar de días de operación de la Planta.	Cantidad/ Millar de Días	$T_{Incidentes} = \frac{\Sigma Incidentes}{\Sigma Días_{Operación}}$	ΣIncidentes: Cantidad de incidentes ambientales. $\Sigma Días_{Operación}$: Cantidad de días de operación.	Se utiliza la unidad "millar de días" para facilitar la interpretación de los resultados del indicador.
	G	E	B	Tasa de incidentes ambientales por alguna variable "x"	Indica la proporción de incidentes ambientales de cierta envergadura con relación a alguna variable de selección "x". *Ej.: "Cantidad de incidentes por Unidad de Negocio", "Cantidad de incidentes por fallos mecánicos"*, etc.	Cantidad/ Millar de días	$T_{Incidentes\ "x"} = \frac{\Sigma Incidentes_{"x"}}{\Sigma Días_{Operación}}$	Σ Incidentes $_{"x"}$: Cantidad de incidentes ambientales, de un criterio de selección "x". $\Sigma Días_{Operación}$: Cantidad de días de operación.	La variable de selección "x" puede referirse a ubicaciones físicas, sectores de Planta, tipos de falla, especialidad responsable del fallo, etc.
	G	S	B	Consumo (absoluto o relativo) de algún recurso no renovable o escaso	Cantidad (o volumen) de algún recurso energético no renovable o escaso con respecto a otra variable de producción. *Ej.: "Consumo de agua por Tn de producto terminado"*.	Vol. Recurso/ Vol. Producción	$Consumo_{"x"} = \frac{Vol._{"x"}}{Vol._{Producción}}$	$Vol._{"x"}$: Cantidad o volumen consumido del recurso. $Vol._{Producción}$: Cantidad o volumen de producción.	Puede calcularse como volumen absoluto o relativo con respecto a alguna variable de referencia.

Figura 12.3.7
Indicadores de Seguridad y Medio Ambiente.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Gastos / Costos	G	S	B	Gasto de Mantenimiento - Nivel de Facturación	Relación entre el gasto total de mantenimiento de una unidad productiva y el monto total facturado por la misma unidad.	%	$I_{M-F} = \frac{G_{TM}}{F}$	G_{TM}: Gasto total de mantenimiento de una unidad productiva. F: Facturación de la misma unidad productiva.	Ambas variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio. Puede abrise en gastos fijos y variables.
	G	S	B	Gasto de Mantenimiento - Valor de Reposición	Relación entre el gasto total anual de mantenimiento de una unidad productiva y su valor de reposición.	%	$I_{M-V_r} = \frac{G_{TAM}}{V_r}$	G_{TMA}: Gasto total anual de mantenimiento de una unidad productiva. V_r: Valor de reposición de la misma unidad.	Ambas variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio. Puede abrise en gastos fijos y variables.
	G	S	B	Gasto de Mantenimiento - Gasto de Producción	Relación entre el gasto total de mantenimiento de una unidad productiva y su equivalente de producción.	%	$I_{M-P} = \frac{G_{TM}}{G_{TP}}$	G_{TM}: Gasto total de mantenimiento de una unidad productiva. G_{TP}: Gasto total de producción de la misma unidad.	Ambas variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	G	S	B	Costo Específico de Mantenimiento	Relación entre el gasto total de mantenimiento de una unidad productiva y el volumen de su producción.	$/ Vol.	$C_{EM} = \frac{G_{TM}}{Volumen}$	G_{TM}: Gasto total de mantenimiento de una unidad productiva. Volumen: Volumen producido por la misma unidad.	Ambas variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio. Puede abrise en gastos fijos y variables.
	G/I	EEE	M	Gasto Global de Mantenimiento	Diferencia entre el valor de reposición de una unidad productiva y la suma de su valor de venta y los gastos totales de mantenimiento.	$	$C_{GM} = V_r - (V_v + G_{TM})$	V_r: Valor de reposición de una unidad productiva. V_v: Valor de venta de la misma unidad productiva. G_{TM}: Gasto total de mantenimiento de la unidad.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio. Puede abrirse en gastos fijos y variables.
	G/I	S	B	Índice de Mano de Obra Propia (MOP)	Relación entre el gasto por mano de obra propia y el gasto total de mantenimiento.	%	$I_{MOP} = \frac{G_{MOP}}{G_{TM}}$	G_{MOP}: Gasto por mano de obra propia. G_{TM}: Gasto total de mantenimiento.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	G/I	S	B	Relación Mano de Obra Propia - Valor de Reposición	Indica la relación entre el gasto de mantenimiento por mano de obra propia y el valor de reposición de la unidad productiva.	%	$I_{MOP-V_r} = \frac{G_{MOP}}{V_r}$	G_{MOP}: Gasto por mano de obra propia. V_r: Valor de reposición de la unidad productiva.	Generalmente este indicador se utiliza para periodos anuales. La misma relación puede usarse con el gasto en fuerza laboral equivalente (FTE).
	J/S	S	B	Índice de Horas Extras (HE)	Indica el porcentaje del gasto en horas extras con relación al gasto total de horas trabajadas (MOP).	%	$I_{HE} = \frac{G_{HE}}{G_{MOP}}$	G_{HE}: Gasto en horas extras. G_{MOP}: Gasto total en mano de obra propia.	Es un indicador muy utilizado en forma mensual.
	I	S	B	Proporción de Horas Hombre	Relación entre las horas hombre destinadas a algún tipo de mantenimiento "x" y el total de horas hombre. *Ej.: "Horas hombre por mantenimiento preventivo, del total de horas hombre", etc.*	%	$P_{HH} = \frac{\Sigma HH_{"x"}}{\Sigma HH}$	$\Sigma HH_{"x"}$: Cantidad de horas hombre destinadas al mantenimiento "x". ΣHH : Cantidad total de horas hombre de mantenimiento.	El total de horas hombre es el tiempo total de presencia en Planta y en condiciones de prestar servicios de mantenimiento.
	G/I	S	B	Índice Mano de Obra Contratada (MOC)	Relación entre el gasto por mano de obra contratada y el gasto total de mantenimiento.	%	$I_{MOC} = \frac{G_{MOC}}{G_{TM}}$	G_{MOC}: Gasto por mano de obra contratada. G_{TM} : Gasto total de mantenimiento.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	G	S	B	Relación MOC - MOP	Relación entre el gasto en mano de obra contratada y su equivalente en mano de obra propia.	%	$R_{MOC-MOP} = \frac{G_{MOC}}{G_{MOP}}$	G_{MOC}: Gasto por mano de obra contratada. G_{MOP}: Gasto por mano de obra propia.	Para cualquier período de análisis definido.
	G/I	S	M	Índice de Materiales (MAT)	Relación entre el gasto en materiales y repuestos y el gasto total de mantenimiento.	%	$I_{MAT} = \frac{G_{MAT}}{G_{TM}}$	G_{MAT} : Gasto en repuestos y materiales. G_{TM} : Gasto total de mantenimiento.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	G/I	S	M	Índice de Terceros (TER)	Relación entre el gasto por servicios de terceros y el gasto total de mantenimiento.	%	$I_{TER} = \frac{G_{TER}}{G_{TM}}$	G_{TER}: Gasto en servicios de terceros. G_{TM} : Gasto total de mantenimiento.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.

Figura 12.3.8
Indicadores de Gastos / Costos.

Grupo	Nivel	Tipo	Dificultad	Indicador					
				Nombre	Descripción	UN	Fórmula	Variables	Comentarios
Gastos / Costos	I	EE	A	Índice de Gastos por Fallos	Relación entre las pérdidas económicas debidas a fallos y el gasto total de mantenimiento.	%	$I_{GpF} = \frac{G_{Fallos}}{G_{TM}}$	G_{Fallos}: Gastos o pérdidas causadas por los fallos imprevistos. G_{TM}: Gasto total de mantenimiento.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	G/I	S	M	Relación MAT - MOP	Relación entre el gasto en repuestos y materiales, y su equivalente en mano de obra propia.	%	$I_{MAT-MOP} = \frac{G_{MAT}}{G_{MOP}}$	G_{MAT}: Gasto en materiales y repuestos. G_{MOP}: Gasto en mano de obra propia.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	G/I	S	M	Relación MAT - FTE	Relación entre el gasto en repuestos y materiales, y su equivalente en fuerza laboral equivalente.	%	$I_{MAT-FTE} = \frac{G_{MAT}}{G_{FTE}}$	G_{MAT}: Gasto en materiales y repuestos. G_{FTE}: Gasto en fuerza laboral equivalente.	Todas las variables deben referirse a la misma unidad o área de negocio.
	I	E	B	Costo de la Gestión de Compra de Repuestos	Indica en valor absoluto (o relativo) del costo de la gestión de compra de un conjunto de repuestos.	$ / Pedidos	$C_{GC} = \frac{\Sigma \text{Gastos}_{Almacén}}{\Sigma \text{Pedidos}}$	$\Sigma Gastos_{Almacén}$: Suma anual de gastos (fijos y variables) del Almacen de Repuestos. ΣPedidos: Cantidad anual de pedidos de compra.	Normalmente se aplica para períodos anuales.
	I	E	M	Asignación de Gastos por Materiales y Repuestos	Gastos en repuestos contabilizados a través de las OT con relación a los gastos de repuestos contabilizados a través del sistema contable (en caso que se trate de sistemas distintos).	%	$A_{MAT-MAT} = \frac{G_{MAT(OT)}}{G_{MAT(Contabilidad)}}$	$G_{MAT(OT)}$: Gasto en materiales y repuestos según lo indicado por las Órdenes de Trabajo. $G_{MAT(Contabilidad)}$: Gasto en materiales y repuestos según lo indicado por el sistema contable.	Es un indicador indirecto del Índice de Rotación y del Stock Inmovilizado de Repuestos.
	I	E	M	Asignación de gastos en Servicios de Terceros	Gastos de servicios de terceros contabilizados a través de las OT con relación a los gastos de terceros contabilizados por el sistema contable (en casos que se trate de sistemas distintos).	%	$A_{TER-TER} = \frac{G_{TER(OT)}}{G_{TER(Contabilidad)}}$	$G_{TER(OT)}$: Gasto en servicios de terceros según lo indicado por las Órdenes de Trabajo. $G_{MAT(Contabilidad)}$ Gasto en servicios de terceros según lo indicado por el sistema contable.	Es una manera de evaluar la correcta asignación de información en el Sistema Informático de Mantenimiento (SIM).
	I	E	M	Asignación de gastos por Mano de Obra	Cantidad de horas hombre contabilizadas a través de las OT con relación a las horas hombre liquidadas por el departamento de Recursos Humanos.	%	$A_{MOP-MOP} = \frac{G_{MOP(OT)}}{G_{MOP(Contabilidad)}}$	$G_{MOP(OT)}$: Gasto en mano de obra propia según lo indicado por las Órdenes de Trabajo. $G_{MOP(Contabilidad)}$: Gasto en mano de obra propia según lo indicado por el sistema contable.	Idem anterior.
	I	S	B	Índice de Mantenimiento Predictivo	Relación entre los gastos por mantenimiento predictivo y el total de gastos de mantenimiento.	%	$I_{Predictivo} = \frac{G_{Predictivo}}{G_{TM}}$	$G_{Predictivo}$: Gasto en mantenimiento predictivo. G_{TM}: Gasto total de mantenimiento.	
	I	S	B	Índice de Mantenimiento Preventivo	Relación entre los gastos por mantenimiento preventivo y el total de gastos de mantenimiento.	%	$I_{Preventivo} = \frac{G_{Preventivo}}{G_{TM}}$	$G_{Preventivo}$: Gasto en mantenimiento preventivo. G_{TM}: Gasto total de mantenimiento.	
	I	S	B	Índice de Mantenimiento Detectivo	Relación entre los gastos por mantenimiento detectivo y el total de gastos de mantenimiento.	%	$I_{Detectivo} = \frac{G_{Detectivo}}{G_{TM}}$	$G_{Detectivo}$: Gasto en mantenimiento detectivo. G_{TM}: Gasto total de mantenimiento.	
	I	EE	B	Consumo de Herramientas	Indica el monto anual medio del consumo de herramientas y máquinas de mano por trabajador.	$	$G_{Herram.} = \frac{G_{Herramientas}}{\Sigma_{Colaboradores}}$	$G_{Herramientas}$: Gasto anual en herramientas y máquinas de mano. ΣColaboradores: Cantidad de trabajadores en Mantenimiento.	Puede aplicarse para un trabajador o para la plantilla completa de Mantenimiento.
	G	S	B	Gasto en Capacitación	Indica la proporción entre los gastos destinados a capacitación del total de gastos de mantenimiento.	%	$G_{Cap.} = \frac{G_{Capacitación}}{G_{TM}}$	$G_{Capacitación}$: Gasto anual en capacitación. G_{TM}: Gasto total de Mantenimiento.	Normalmente se aplica para períodos anuales.

Figura 12.3.8
Indicadores de Gastos / Costos (Continuación).

12.4 Tableros de Control de Mantenimiento

Un Tablero de Control es el instrumento ideal para evaluar el comportamiento de los índices de gestión. Cada sección del área de mantenimiento debe confeccionar su propio tablero. En él se agruparán los índices que correspondan al proceso de que se trate. Los Tableros de Control (o Gestión) no se usan únicamente a nivel Gerencial. La oficina de Supervisores y el área de Ingeniería de Mantenimiento deberían contar con su propio tablero.

Un Tablero de Control (TC) permite en primera instancia identificar las zonas de oportunidad y las áreas potencialmente factibles de mejorar. Además, despoja suposiciones (hechos que se aceptan como válidos y entendidos, aunque no lo sean). El grupo de indicadores de cada tablero debe respetar el criterio marcado en la sección 12.2 sobre agrupación y clasificación. Además, debe propiciar y divulgar la misión y los objetivos estratégicos de la organización. El seguimiento de los índices y el intercambio de opiniones que sobre éstos se haga, sirven para coordinar las iniciativas individuales y fomentar el accionar conjunto de las personas (fomenta la participación y el compromiso).

Siempre es aconsejable que los tableros estén acompañados de gráficos de tendencias en relación a valores históricos o referenciales (ver figura 12.4.4). Un gráfico resume información y permite entender la evolución de las variables; convierte datos en información. Un gráfico ilustra, en forma clara y concisa, los datos convertidos en información visual para entender: orden de magnitud de las variables, tendencias, desvíos en relación a una referencia, peso relativo de cada factor, etc. Por tanto, para obtener dichos beneficios, es preciso armar los gráficos pensando en los usuarios y en sus necesidades particulares.

También son prácticas las convenciones de colores del tipo semaforización. Con un código de colores (verde, amarillo y rojo) muestran si las variables medidas están bien, regular o mal. Los tableros deben incluir un procesamiento temporal; esto es: mirar hacia atrás, mostrar los valores actuales y pronosticar, lo más acertadamente posible, la tendencia futura del proceso.

El principal desafío al confeccionar un tablero es lograr que tenga la mayor cantidad de información y la menor cantidad de datos.

El formato escogido para los tableros debe ser estandarizado en toda la empresa (inclusive fuera del departamento de Mantenimiento). La forma de calcular cada índice debe ser pública y, en la medida de lo posible, estar descripta en los procedimientos corporativos. Algunas empresas han logrado incorporar la forma de cálculo de los índices en el propio tablero.

Todos los involucrados en la confección y seguimiento de los indicadores deben entenderlos de igual forma. La frecuencia de actualización de la información depende de factores ya descriptos; sin embargo, cada sección podrá tener un Tablero de Control diario y otro mensual o semanal.

Cada TC (independientemente del nivel del observador) tendrá entre sus índices algunos de mayor importancia. A éstos se los llama KPI (Key Performance Indicators). Por ejemplo, si Ingeniería de Mantenimiento tiene un Tablero de Control con diez indicadores, tal vez haya dos o tres que sean KPI's. Lo mismo ocurre con el resto de los tableros de gestión.

Por lo general, el área de mantenimiento estandariza tres tableros. Uno conocido como **Tablero Gerencial** que contiene básicamente índices de efectividad vinculados a la Gestión de Gastos / Costos, Personal y Seguridad y Medio Ambiente. Luego, el **Tablero de Ingeniería de Mantenimiento** agrupa aquellos índices vinculados a gastos, desempeño operativo del sector, distribución de recursos y fuerza laboral, etc. Por último, cada taller u oficina tiene su **Tablero Operativo** que incluye indicadores de Gestión Operativa a nivel de activos y algunos índices de gestión de personal y seguridad.

Conforme se desciende en el nivel jerárquico, los indicadores pueden y deben ser distintos. Sin embargo, los KPI's de los niveles superiores deben aparecer en el tablero de control con entidad referencial. Pongamos un ejemplo.

Supóngase que el tablero de la oficina de supervisores (Tablero Operativo) maneja doce indicadores entre los que hay índices de disponibilidad, confiabilidad, etc. (ver figura 12.4.1). Supóngase, además, que cuatro de ellos son KPI's del propio nivel. Si bien este sector tiene como único objetivo cumplir con las expectativas de los doce índices mencionados (sobre todo los KPI's), está dentro de su obligación y derecho conocer los KPI's corporativos a través de la inclusión en el reporte (ángulo superior derecho).

									Inmov. [M$-mes]				Cons. Agua [lt/Tn]		I_{GpF} [%]
						Plan	95,2	762	91,0	56,0	0	120	345	2,3
						Real	95,5	766	90,1	56,2	0,96	117,4	341	2,4
Disponibilidad Operacional (Línea "X1") [%]	90,5	91,5	91,8	93,6	92,9	Plan	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8
						Real	92,1	92,3	93,1	92,5	93,2	92,1	93,4	93,6	93,5	92,9
Disponibilidad Operacional (Línea "X2") [%]	91,0	91,7	92,1	93,4	92,3	Plan	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1	92,1
						Real	93,4	93,2	92,1	91,0	91,1	91,8	92,3	92,7	93,0	92,6
Confiabilidad Dispositivo Principal "Y" [%]	72,0	72,6	74,8	77,5	73,8	Plan	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8	74,8
						Real	76,4	77,5	69,8	70,4	70,9	74,8	75,6	75,8	75,2	71,2
Atención de pedidos [Días]	3,0	3,0	2,8	2,0	2,9	Plan	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
						Real	3,8	4,3	2,7	2,6	2,7	3,8	2,6	2,1	2,4	2,0
Porcentaje de OT Cerradas [%]	88,5	90,5	91,4	92,4	90,3	Plan	91,2	91,2	91,2	91,2	91,4	91,4	91,4	91,4	91,6	91,6
						Real	89,8	89,6	90,7	90,6	91,5	91,4	87,8	87,6	91,8	92,4
Desvío promedio de cierre de OT [Días]	4,0	3,6	3,5	3,1	3,7	Plan	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
						Real	3,1	3,2	3,4	3,7	3,7	3,6	4,5	5,0	3,4	3,4
Tasa de Ausentismo [%]	3,5	3,2	2,8	1,8	2,1	Plan	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
						Real	2,0	1,8	2,0	2,0	3,5	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0
Índice de Horas Extras [%]	1,9	1,4	1,3	0,8	1,2	Plan	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
						Real	0,8	1,2	1,1	1,4	1,5	1,9	1,2	0,9	0,8	1,1
EGE Línea "X1" [%]	60,5	60,8	61,2	62,6	61,4	Plan	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2
						Real	62,3	60,9	61,2	61,5	57,8	62,1	61,9	61,6	62,1	62,6
Cumplimiento de OT programadas [%]	91,5	94,5	95,0	96,9	95,8	Plan	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
						Real	95,6	96,8	96,2	96,9	95,4	95,8	94,1	95,2	95,9	96,1
Backlog de OT Correctivas [Días]	3,5	3,2	3,0	2,8	3,4	Plan	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
						Real	3,8	4,8	3,9	3,7	3	2,9	2,8	3,4	3,2	2,8
Efectividad Mantenimiento Detectivo [%]	97,6	97,8	98,0	99,0	98,7	Plan	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0	98,0
						Real	98,5	98,4	99,0	98,8	98,6	98,7	98,7	98,7	98,7	98,9

Figura 12.4.1
Tablero de Control Operativo (Supervisión)

Tablero de Control de Ingeniería (Ing. de Mantenimiento) [Año 2008]

		ICM [%]	Inmov. [M$-mes]	$E_{mejoras}$ [%]	PTE (Línea "X1" [%]	$D_{Perdidos}$ [días/MHH]	$Cons._{Agua}$ [lt/Tn]	C_{EM} [$/TN]	I_{GpF} [%]
KPI's Corporativos	Plan	95,2	762	91,0	56,0	0	120	345	2,3
	Real	95,5	766	90,1	56,2	0,96	117,4	341	2,4

Indicadores	Base Histórica	Acum. Año 07'	Ppto. Año 08'	Mejor Mes	Acum. Año 08'	Año Actual	Meses									
							Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
Disponibilidad Operacional (Línea "X1") [%]	90,5	91,5	91,8	93,6	92,9	Plan	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8
						Real	92,1	92,3	93,1	92,5	93,2	92,1	93,4	93,6	93,5	92,9
Índice de Horas Extras [%]	1,9	1,4	1,3	0,8	1,2	Plan	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
						Real	0,8	1,2	1,1	1,4	1,5	1,9	1,2	0,9	0,8	1,1
EGE Línea "X1" [%]	60,5	60,8	61,2	62,6	61,4	Plan	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2
						Real	62,3	60,9	61,2	61,5	57,8	62,1	61,9	61,6	62,1	62,6
Relación MOC - MOP [%]	14,2	12,2	11,4	9,8	13,3	Plan	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
						Real	13,4	15,7	9,8	10,6	11,2	12,8	25,0	11,0	12,0	11,0
Fuerza Laboral Equivalente [Unidad]	24,2	23,5	23,0	21,4	23,6	Plan	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
						Real	22,5	21,4	23,0	22,5	24,0	24,5	22,9	23,4	29,0	22,8
Cierre de ADF's [%]	82,5	88,6	89,0	91,2	87,4	Plan	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0	89,0
						Real	88,7	82,1	83,2	86,8	88,5	91,2	88,5	88,5	88,7	88,2
Índice de Terceros [%]	22,5	23,4	22,0	20,5	22,6	Plan	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
						Real	21,0	23,4	20,5	21,6	21,8	21,6	23,5	27,8	23,6	21,5
KPI's							**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**
Costo Específico de Mantenimiento [$/Tn]	352	349	345	325	341	Plan	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345
						Real	325	346	329	342	362	344	340	339	345	335
Productividad Total de Línea "X1" [%]	53,8	54,2	56,0	56,8	56,2	Plan	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
						Real	56,1	56,2	56,2	55,8	56,3	56,3	56,2	56,3	56,8	55,5
Cumplimiento Plan de Mantenimiento (ICM) [%]	93,5	94,8	95,2	97,8	95,5	Plan	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
						Real	95,5	95,9	94,5	95,5	95,1	94,8	94,5	95,3	95,6	97,8
Tasa de accidentes [Días/MHH]	0,40	0,20	0,00	0,00	0,96	Plan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
						Real	0,0	0,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Cumplimiento de proyectos RCM [%]	88,6	90,6	91,0	95,2	90,1	Plan	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0	91,0
						Real	94,5	95,2	94,1	92,7	90,7	90,7	90,5	90,5	82,4	79,8

Figura 12.4.2
Tablero de Control de Ingeniería (Ing. de Mantenimiento).

		ICM [%]	Inmov. [M$-mes]	$I_{M\text{-}Vr}$ [%]	$E_{mejoras}$ [%]	PTE (Línea "X1" [%]	$D_{Pérdidas}$ [días/MHH]	$Cons._{Agua}$ [lt/Tn]	C_{EM} [$/TN]	$T_{Incidentes}$ [Cant./MD]
	Plan	95,2	762	3,2	91,0	56,0	0	120	345	0,1
	Real	95,5	766	3,1	90,1	56,2	0,96	117,4	341	0,0

Indicadores	Base Histórica	Acum. Año 07'	Ppto. Año 08'	Mejor Mes	Acum. Año 08'	Año Actual	Meses									
							Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
Gasto de Mantenimiento / Facturación [%]	7,9	8,1	7,9	7,5	7,8	Plan	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
						Real	7,6	7,5	7,6	7,8	7,9	8,0	7,8	7,9	8,1	7,8
Costo Específico de Mantenimiento [$/Tn]	352	349	345	325	341	Plan	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345
						Real	325	346	329	342	362	344	340	339	345	335
Productividad Total de Línea "X1" [%]	53,8	54,2	56,0	56,8	56,2	Plan	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
						Real	56,1	56,2	56,2	55,8	56,3	56,3	56,2	56,3	56,8	55,5
Consumo de Agua [lt/Tn]	128,0	123,0	120,0	112,0	117,4	Plan	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
						Real	118	118	112	119	118	119	121	116	117	116
Fuerza Laboral Equivalente [Unidad]	24,2	23,5	23,0	21,4	23,6	Plan	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
						Real	22,5	21,4	23,0	22,5	24,0	24,5	22,9	23,4	29,0	22,8
Orden y Limpieza de Oficinas y Talleres	B	B	MB	MB	B	Plan	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
						Real	MB	B	R	B	MB	MB	MB	R	M	MB
Inventario Inmovilizado [M$-mes]	772	781	762	756	766	Plan	762	762	762	762	762	762	762	762	762	762
						Real	757	757	756	771	767	767	767	763	774	780
Horas Hombre Correctivas / Preventivas [%]	26,0	26,5	25,0	21,0	23,2	Plan	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
						Real	21,0	21,5	21,0	25,6	25,1	23,0	23,5	22,8	24,5	23,8
KPI's							**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**
Tasa de incidentes ambientales [Cantidad/MD]	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	Plan	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
						Real	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tasa de accidentes [Días/MHH]	0,40	0,20	0,00	0,00	0,96	Plan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
						Real	0,0	0,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Productividad Total de Línea "X1" [%]	53,8	54,2	56,0	56,8	56,2	Plan	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
						Real	56,1	56,2	56,2	55,8	56,3	56,3	56,2	56,3	56,8	55,5
Gasto de Mantenimiento / Valor de Reposición [%]	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	Plan	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
						Real	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

Figura 12.4.3
Tablero de Control Gerencia (Gerencia de Mantenimiento).

Los esquemas de *gestión abierta e informativa*, eliminan o minimizan las inferencias[1].

Otra característica importante de los Tableros de Control es que los límites o metas de cada índice deben estar claramente establecidos.

Cabe hacerse las siguientes preguntas al momento de armar un Tablero de Control:

√ ¿Se medirá realmente lo necesario para gestionar el sector? No debemos medir procesos intrascendentes que no aportan valor a la gestión integral y corporativa.
√ ¿No se medirá de más ni de menos? No dilapidar recursos ni escatimarlos si el beneficio lo justifica.
√ ¿Son confiables los datos de formación? Hacer seguimiento de estimaciones no agrega ningún valor.
√ ¿Los indicadores son los necesarios para cada nivel de la estructura? Un técnico de mantenimiento no necesita los mismos indicadores que un gerente, y viceversa.
√ ¿La información está disponible para quien la necesita?, ¿llega a quién la necesita? Debe procurarse que la información no descanse en un archivo que nadie lee.
√ ¿Las personas que generan datos y/o información, saben para qué sirven?

Además, un Tablero de Control debe responder las siguientes preguntas:

√ *¿De donde venimos?* ***Pasado.***
√ *¿Dónde estamos y qué estamos haciendo para cambiar?* ***Presente.***
√ *¿Dónde estaremos más probablemente de seguir así?* ***Futuro.***

La figura 12.4.4 ilustra un ejemplo de seguimiento de los gastos de mantenimiento para un período bianual (08' y 09'). El incremento de gastos totales al inicio del año obedece a trabajos de Parada Anual de Planta, las tareas se realizan en Enero pero parte de la facturación de los servicios externos puede influir en los gastos de Febrero. El reporte muestra Gastos Reales hasta el mes 7 (Julio) del 2009 inclusive y el Pronóstico (Forecast[2]) a partir de Agosto del mismo año.

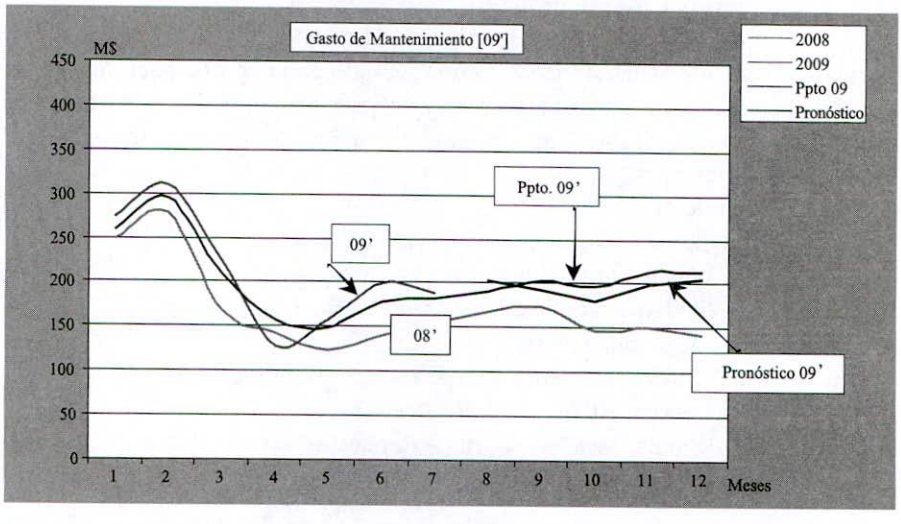


Figura 12.4.4 Ejemplo de evolución de Gastos Totales de Mantenimiento.

Habiendo establecido el paquete de indicadores para cada Tablero de Control, identificado cuáles de ellos serán KPI's, determinado la frecuencia de seguimiento, convenido las metas y objetivos de corto, mediano y largo plazo; sólo resta ponerlo en práctica.

Inicialmente los ajustes serán muchos y responderán a cuestiones de cálculo, errores en los datos y percepciones. Las percepciones nublan la realidad porque uno cree estar viendo algo que no es más que lo que nuestra mente quiere ver (una abstracción inconsciente).

Los consecuentes seguimientos del Tablero de Control mostrarán brechas (gaps) entre los niveles de desempeño alcanzados y las metas u objetivos planificados y comprometidos.

---

1 Una inferencia es una conclusión surgida del análisis basado en la lógica individual.
2 En inglés, pronóstico.

12.4.1 Reporte Gerencial

Cada uno de los índices de este reporte debe representar la misión y los objetivos corporativos del negocio. También tendrán en cuenta los aspectos financieros y económicos de la empresa y las cuestiones de seguridad personal y cuidado del medio ambiente. Puede incluir también, algún otro indicador ocasional o de interés particular, aunque sea transitorio. Algunos de los indicadores más utilizados a nivel gerencial son:

√ Cumplimiento del presupuesto de mantenimiento.
√ Gasto total de mantenimiento.
√ Costo específico de mantenimiento.
√ Relación entre los gastos de mantenimiento por mano de obra y materiales.
√ Tasa de accidentes e incidentes.
√ Productividad de alguna línea o unidad operativa en particular.
√ Cumplimiento de las actividades planificadas por el área.
√ Nivel de inventario inmovilizado de repuestos.

12.4.2 Reporte Corporativo (o de Divulgación)

Algunas compañías confeccionan reportes de divulgación o publicación que pueden contener los siguientes índices:

√ Consumo de algún recurso no renovable.
√ Tasa de accidentes.
√ Tasa de incidentes ambientales.
√ Índice de antigüedad.
√ Índice de capacitación.
√ Consumo de energía o combustibles.
√ Obras de ayuda a la comunidad.

12.4.3 Reporte de Ingeniería de Mantenimiento

Este conjunto de indicadores debe reflejar el desempeño y la efectividad de las actividades impulsadas por Mantenimiento. Se analiza semanalmente en una reunión con la participación del Gerente, Ingeniero y Jefe de Mantenimiento (ocasionalmente Supervisores y Programadores). Se busca cumplir con metas y objetivos, incluido el gasto de Mantenimiento. El Tablero puede contener:

√ Gasto total de mantenimiento.
√ Evolución de la gestión global y cumplimiento de ADF's.
√ Productividad de alguna línea o unidad operativa en particular.
√ Cumplimiento de las actividades planificadas de Mantenimiento.
√ Índice de cumplimiento de pedidos de trabajo.
√ Tasa de accidente e incidentes (de suceder, revisar las tasas individuales).
√ Avance de los planes de mejora (RCM, TPM, RCA, etc.).
√ Demoras en la entrega de materiales (Almacén de Repuestos).
√ Efectividad de los distintos tipos de mantenimientos pro-activos.

12.4.4 Reporte Operativo

Dentro de los índices que contiene este tipo de reportes, encontramos:

√ Disponibilidad de equipos o unidades operacionales.
√ Confiabilidad de sistemas.
√ Tasa de ausentismo.
√ Índice de horas extras.
√ Backlog de Órdenes de Trabajo.
√ Efectividad de los distintos tipos de mantenimiento.
√ Demora en la atención de pedidos de trabajo.

12.5 Mejorar a partir de la medición diaria

El proceso de gestión diaria de mantenimiento (GDM) es uno de los más importantes para el éxito de la gestión de activos. También conocido como DMM (del inglés, Daily Management Maintenance) consiste en propiciar un ámbito cotidiano de identificación y resolución de problemas. Hay departamentos de mantenimiento que lo practican informalmente a través de reuniones diarias al inicio de la jornada de trabajo. En estos casos únicamente se tratan los temas relacionados a los fallos ocurridos durante la noche anterior y la forma más apropiada de solucionarlos. Estas reuniones sólo están orientadas a trabajar sobre el Mantenimiento Correctivo.

Sin embargo, una metodología de gestión diaria bien organizada y guiada por un facilitador, tiende a la mejora continua y a la eliminación de los problemas crónicos. Si bien son de índole operativa, le permiten a Ingeniería de Mantenimiento identificar las situaciones potencialmente mejorables de mediano y largo plazo. Debe decirse que este método de gestión fue adaptado de los círculos de calidad del TQM (Total Quality Management).

A las reuniones de DMM (nunca mayores a 45 minutos) deben acudir Supervisores, Jefes, Analistas, Programadores e Ingenieros de Mantenimiento, cada uno con un objetivo específico.

Sus obligaciones se resumen a continuación:

√ **Supervisores**. Exponer las novedades operativas más importantes ocurridas en el turno y las consecuencias que éstas produjeron en el sistema productivo. Compartir con el grupo las novedades de interés general en lo que hace a la relación personal de los colaboradores. Tiempo aproximado, 15 minutos.

√ **Jefes**. Colaborar en la solución técnica de las averías. Dar respuesta a las inquietudes planteadas por los Supervisores. Exponer el Tablero Operativo con la ayuda de los Ingenieros de Mantenimiento y aportar recomendaciones y acciones en consecuencia. Tiempo aproximado, 15 minutos.

√ **Analistas y Programadores**. Antes de la reunión, preparar la información necesaria (reportes, registros, listados, gráficos, etc.). Registrar los fallos ocurridos para luego, y fuera de la reunión, estudiar detalladamente el progreso de las averías con miras a evitar su recurrencia. Para los fallos de cierta consecuencia[1] deben impulsar un ADF. Explicar las decisiones tomadas en relación a los fallos sucedidos con anterioridad (modificación de equipos, rediseños, creación o mejora de planes de mantenimiento, etc.). Por lo general, cae bajo la responsabilidad de un Analista o Programador documentar en una minuta los temas tratados en la reunión, al día siguiente la misma se circula entre todos los participantes. Tiempo aproximado, 5 minutos.

√ **Ingenieros de Mantenimiento**. Proponer alternativa de mejora para los resultados no positivos del Tablero de Control Operativo. Explicar el impacto de cada falla y priorizar las acciones de mejora en la que trabajarán Analistas y Programadores. Transmitir las políticas corporativas de interés general (Seguridad y Medio Ambiente, Capacitación, Eventos, Remuneración, etc.) cuando el Gerente de Mantenimiento utilice la figura del Ingeniero de Mantenimiento para estas cuestiones. Informar acerca de los KPI's corporativos al menos una vez en la semana. Tiempo aproximado, 10 minutos.

√ **Especialistas Mantenedores**. En ocasiones puede ser necesaria la participación de algún especialista para explicar bajo qué circunstancias se produjeron los fallos, cómo se realizó cierta reparación o cualquier evento de interés general.

Posteriormente, y fuera de la reunión, Analistas, Programadores e Ingenieros decidirán los pasos a seguir en relación a los temas levantados en la última reunión. Cada acción acordada deberá indicar un responsable y una fecha estimada de finalización.

---

1 Ingeniería de Mantenimiento debe definir el criterio para decidir qué fallos ameritan un ADF.

12.6 Diagnósticos de Mantenimiento

Cuando la situación de un área de mantenimiento da indicios de un desempeño insatisfactorio, o cuando es necesario evaluar un departamento de mantenimiento, se presenta la posibilidad de realizar un diagnóstico que permita descubrir las zonas débiles así como las oportunidades de mejora.

Si bien es una especialidad el efectuar auditorias de mantenimiento, nada impide que en esta sección se muestre un ejemplo de planilla de evaluación como punto de partida para mejorar los procesos de gestión de activos. La tabla siguiente contiene un conjunto de preguntas cuyas respuestas dan un panorama bastante claro de cuál es el estado situacional del área analizada.

Cuestionario de Aproximación para Diagnósticos de Mantenimiento

1.-	¿Cuál es el nivel de Mano de Obra contratada?	13.-	¿Existe un Plan de Mantenimiento Detectivo?
	< 10%		No
	entre 10 y 20%		Sólo parcialmente
	> 20%		Sí, y para todos los equipos de seguridad
2.-	¿Cuánto tiempo dedica Mantenimiento a Rediseños?	14.-	¿Existe un Plan Anual de Capacitación?
	< 5%		Sí
	> 5%		No
3.-	¿Están las funciones de los puestos bien definidas?	15.-	¿Se aplican métodos de análisis (RCM, RCA, ADF's)?
	No claramente		Nunca
	Algunas sí y otras no		En pocas ocasiones
	Todas están claramente definidas		Siempre que es necesario
4.-	¿Existe un Plan de Mantenimiento Preventivo y Predictivo?	16.-	¿Se utilizan indicadores de gestión?
	No existe Plan de Mantenimiento Preventivo y Predictivo		En ningún nivel de la organización
	Existe para algunos equipos sin buenos resultados.		En algunos niveles de la organización
	Existe para algunos equipos con buenos resultados.		En todos los niveles de la organización
5.-	¿Saben todos los Supervisores qué es un modo de falla?	17.-	¿Existe una valorización económica de las averías más importantes ?
	No		En ningún caso
	Alguno/s		Sólo para ciertos equipos, pero no es suficiente
	Todos		Para todos los equipos en los que es necesario
6.-	¿Saben los Jefes o Gerentes qué es un modo de falla?	18.-	¿Los repuestos del Almacén están catalogados?
	No		Ninguno
	Alguno/s		Los más importantes
	Todos		Todos
7.-	¿El Mantenimiento Correctivo es controlado o deliberado?	19.-	¿Es rápido y sencillo obtener el gasto en repuestos de cualquier equipo?
	Controlado		No
	Un poco de cada cosa		Sólo en pocos casos
	Deliberado		En todos los casos
8.-	¿Se hacen análisis (bajo registro) luego de sucedidos los fallos?	20.-	¿Los operarios de Producción realizan algún tipo de tareas de Mantenimiento?
	Nunca		Ninguna
	En algunos casos		Muy pocas
	Siempre		Limpieza, lubricación y/o ajustes menores
9.-	¿Existe un seguimiento riguroso de los gastos?	21.-	¿Existe la figura del Ingeniero de Mantenimiento?
	Sí		No
	Sí, pero no riguroso		Con dedicación parcial
	Riguroso en todos los casos		Con dedicación total
10.-	¿Cuál es la cantidad promedio de Operarios por Supervisor?	22.-	¿Personal de Producción participa de los análsis de fallas?
	< 4		Nunca
	entre 4 y 10		Pocas veces
	> 10		En casi todos los casos
11.-	¿Existe vigente un Sistema Informático de Mantenimiento?	23.-	¿Cuál es el porcentaje aproximado por Servicios de Terceros en relación al gasto total de mantenimiento?
	Sí		< 20%
	No		> 20%
12.-	¿Los trabajos se efectúan con Órden de Trabajo (OT)?	24.-	¿Existe vigente y actualizado un listado de Equipos relevantes para la seguridad?
	No		No
	En algunos casos		Sí, pero no actualizado
	En la mayoría de los casos		Sí, y permanentemente actualizado
	En todos los casos		

Figura 12.6.1
Cuestionario de aproximación para Diagnósticos de Mantenimiento.

En esta tabla puede apreciarse que el total de preguntas formuladas (24) tiene la finalidad de poner en evidencia el nivel de profesionalismo en la gestión de activos fijos.

No obstante, si fuese necesario o posible hacer un estudio más profundo de la situación del área de Mantenimiento se debería aplicar el siguiente paquete de cuestionarios que se muestra en las figuras siguientes. El primero, (A), indaga sobre las capacidades de planificación (ver figura 12.6.2). El segundo, (B), permite evaluar el sistema de gestión y la importancia que tiene la función de Ingeniería de Mantenimiento (figura 12.6.3).

No	≤35%	≤75%	≤100%	Total		Cuestionario para Diagnósticos de Mantenimiento
					A	**Planificación del Mantenimiento**
					1	Los sistemas, subsistemas y activos, ¿están codificados en un sistema informático?
					2	Las Órdenes de Trabajo (OT) refieren el/los activo/s intervenido/s?
					3	¿Existe un proceso vigente de actualización para la codificación de activos?
					4	Los sistemas, subsistemas y activos, ¿estan identificados fisicamente en la Planta?
					5	¿Existe algún criterio establecido y vigente para priorizar los fallos?
					6	Las acciones Pro-activas (Preventivo/Predictivo/Detectivo), ¿se elaboran según las consecuencias de los fallos?
					7	¿Existe un sistema formal de pedidos de reparación al alcance de los supervisores de Producción?
					8	Los Trabajos Programados, ¿tienen estimadas las horas y los materiales necesarios para su ejecución?
					9	¿Son las OT utilizadas por todos los operarios (Mantenimiento y Producción)?
					10	¿Se encuentra vigente y en uso un Reporte diario de mantenimiento?
					11	¿Existe una planificación diaria para las tareas de mantenimiento?
					12	¿Se utilizan indicadores para optimizar la planificación diaria?
					13	¿Conocen todos los colaboradores de Mantenimiento estos indicadores?
					14	¿Se analiza el cumplimiento del plan diario al finalizar la jornada o al inicio de la siguiente?
					15	Todas las tareas de mantenimiento, ¿están incluidas en el plan diario?
					16	¿Existe una instancia de revisión del plan diario con los responsables de Producción, al menos semanal?
					17	Las tareas asignadas, ¿guardan entre ellas un orden de prioridad?
					18	La programación diaria, ¿mide la fuerza laboral disponible y las horas estimadas de los trabajos?
					19	¿Hay una planificación semanal para las tareas de mantenimiento?
					20	¿Existe un Reporte de mantenimiento con frecuencia de revision semanal?
					21	¿Existe una instancia de revisión del plan semanal con los responsables de Producción?
					22	Las tareas asignadas en el plan semanal, ¿guardan entre ellas un orden de prioridad?
					23	El plan semanal, ¿está relacionado técnicamente con el Plan Anual de Mantenimiento?
					24	El Reporte semanal de mantenimiento, ¿contiene KPI's e indicadores de Gastos / Costos?
					25	¿Existe un plan anual o semestral de mantenimiento Pro-activo?
					26	¿Considera el plan anual o semestral los recursos necesarios y los disponibles?
					27	El plan anual o semestral, ¿tiene en cuenta los planes de producción?
					28	¿Se revisa regularmente el plan anual o semestral de Mantenimiento?

Figura 12.6.2
Cuestionario (A), Planificación del Mantenimiento.

No	≤ 35%	≤ 75%	≤ 100%	Total	Cuestionario para Diagnósticos de Mantenimiento
					B **Sistema de Gestión e Ingeniería de Mantenimiento**
					1 ¿Existe vigente y en uso cotidiano un Sistema Informático de Mantenimiento (SIM)?
					2 ¿Hay definidos usuarios claves para el SIM?
					3 ¿Están todos los Trabajos Programados ingresados y actualizados en el SIM?
					4 ¿El SIM alcanza a todos los equipos de Planta incluyendo la infraestructura edilicia?
					5 ¿Existe un proceso para ingresar las novedades al Historial en el SIM?
					6 Las OT cerradas, ¿contienen horas-hombre, materiales e importe de los servicios contratados?
					7 ¿Contiene el SIM el registro de las detenciones de los sistemas o activos relevantes?
					8 ¿Existe un registro (Historial) para las tareas de Mantenimiento Detectivo?
					9 ¿Es posible desde el SIM, evaluar los costos (parciales y totales) de Mantenimiento de cada activo?
					10 Todos los resultados de las intervenciones Pro-activas, ¿se ingresan al SIM?
					11 ¿Existen en el organigrama las figuras de Ingeniero, Analista y Programador de Mantenimiento?
					12 ¿Hay suficientes datos y están accesibles para obtener el MTBF, MTTF, MTTR de los equipos relavantes?
					13 ¿Se aplican estos indicadores operativos para elaborar o ajustar las rutinas de mantenimiento?
					14 El concepto de Mantenimiento Basado en Condición, ¿es comprendido por todo el personal de Mantenimiento?
					15 ¿Se utiliza apropiadamente la información surgida de las inspecciones Basadas en Condición?
					16 ¿Se revisan regularmente las rutinas de Mantenimiento Basado en Condición?
					17 El concepto de Mantenimiento Detectivo, ¿es comprendido por todo el personal de Mantenimiento?
					18 ¿Se revisan regularmente las rutinas de Mantenimiento Detectivo?
					19 ¿Existen chequeos funcionales efectuados por personal de Producción y auditados por Mantenimiento?
					20 ¿Se utiliza apropiadamente la información surgida de las tareas de búsqueda de fallos?
					21 ¿Existe un programa de Parada Anual aprobado por los responsables de Mantenimiento y Producción?
					22 El programa de Parada Anual, ¿contiene tareas, recursos necesarios, repuestos, etc.?
					23 El programa de Parada Anual, ¿contiene fechas de inicio y fin para todas las tareas?
					24 Todas las novedades relevadas durante el año, ¿se usan para optimizar el programa de Parada Anual?
					25 ¿Existe un coordinador de Parada Anual?
					26 ¿Existe un ámbito de análisis y revisión al finalizar la Parada Anual?
					27 ¿Existen indicadores de eficacia y efectividad para las tareas de Parada Anual?
					28 La programación de los trabajos de Parada Anual, ¿considera los riesgos inherentes?

Figura 12.6.3
Cuestionario (B), Sistema de Gestión e Ingeniería de Mantenimiento.

No	≤ 35%	≤ 75%	≤ 100%	Total	Cuestionario para Diagnósticos de Mantenimiento
					C **Procesos de Mejora**
					1 ¿Hay en uso algún método de análisis/mejora como RCM, RCA, Análisis P-M, Six-Sigma, TPM, etc.?
					2 El/los método/s de análisis/mejora vigente/s, ¿son entendidos por todo el personal de Mantenimiento?
					3 ¿Se utiliza el/los método/s de análisis/mejora para elaborar y optimizar los planes de Mantenimiento?
					4 ¿Se utiliza el/los método/s de análisis/mejora para promover rediseños o modificaciones?
					5 ¿Se utiliza el/los método/s de análisis/mejora para identificar las necesidades de capacitación?
					6 ¿Se encuentra/n el/los método/s de análsis/mejora apropiadamente documentado/s?
					7 ¿Se utilizan diagramas de Pareto para analizar problemas recurrentes?
					8 ¿Existe una rutina regular de análisis de fallos repetitivos?
					9 ¿Existen procedimientos y especificaciones para los trabajos de mantenimiento?
					10 ¿Los procedimientos y especificaciones son utilizados por todos los colaboradores?
					11 El/los método/s de análisis/mejora vigente/s, ¿tienen en cuenta la Seguridad Personal?
					12 El/los método/s de análisis/mejora vigente/s, ¿tienen en cuenta el Medio Ambiente?

Figura 12.6.4
Cuestionario (C), Procesos de Mejora.

No	≤ 35%	≤ 75%	≤ 100%	Total	Cuestionario para Diagnósticos de Mantenimiento	
					D	**Repuestos y Materiales**
					1	¿Existe un Sistema de Gestión de Stock (SGS) informatizado?
					2	¿Están todos los repuestos y materiales catalogados e ingresados al SGS?
					3	¿Están los repuestos en las ubicaciones físicas que dicta el SGS?
					4	¿Es necesario el número de OT para retirar repuestos del Almacén o Depósito?
					5	¿Tienen todos los ítems un nivel mínimo y máximo de stock?
					6	¿Tienen todos los ítems un punto de pedido o reorden?
					7	¿Hay indicadores que refieren el nivel de stock inmovilizado?
					8	¿Están debidamente identificados los repuestos y materiales obsoletos?
					9	¿Existe un pañol de herramientas o área de similar funciones debidamente organizada?
					10	¿Existe un plan de mantenimiento preventivo para aquellos repuestos que lo requieran?
					11	¿Se realizan regularmente auditorías internas para medir los desvíos de existencias?
					12	¿Existe una lista completa y actualizada de repuestos para los activos relevantes?
					13	¿Se utiliza la lista de material por equipo al definir las políticas de repuestos?
					14	¿Existe una revisión, al menos anual, de las políticas de stock?

Figura 12.6.5
Cuestionario (D), Repuestos y Materiales.

Las dos figuras anteriores (12.6.4 y 12.6.5) se refieren al grado de desarrollo que tienen las nuevas herramientas de mejora y al manejo del material técnico, respectivamente. En todos los casos, las preguntas pueden adaptarse a las condiciones particulares de la organización. Sin embargo, es de esperar que guarden el mismo criterio de análisis para poder obtener un panorama real de la situación del área.

No	≤ 35%	≤ 75%	≤ 100%	Total	Cuestionario para Diagnósticos de Mantenimiento	
					E	**Estructura de Mantenimiento**
					1	En todos los niveles de la estructura, ¿cree Ud. que es apropiado el Span of Control (SOC)?
					2	¿Hay una relación y comunicación fluida entre los responsables de Mantenimiento y Producción?
					3	¿Existe vigente y actualizada una matriz de habilidades para los colaboradores de Mantenimiento?
					4	¿Indica la matriz, las habilidades y competencias requeridas para cada trabajador?
					5	¿Existe un plan anual de capacitación basado en las matrices de habilidad?
					6	¿Se revisan las matrices de habilidad con regularidad?
					7	¿Se utilizan las matrices de habilidad para planificar y promover la rotación del personal?
					8	¿Se utilizan las matrices de habilidad para promocionar al personal?
					9	¿Existe una política formal y vigente de Mantenimiento Autónomo?
					10	¿Están los conceptos de Mantenimiento Autónomo entendidos por todo el personal de Planta?
					11	¿Existen rutinas o chequeos diarios que realiza el sector productivo?
					12	La capacitación de los operadores autónomos, ¿la realiza personal de Mantenimiento?
					13	¿Tienen los ejecutantes las habilidades y competencias necesarias para cada tarea de mantenimiento?
					14	El personal de Mantenimiento, ¿es polivalente (polifuncional)?

Figura 12.6.6
Cuestionario (E), Estructura de Mantenimiento.

No	≤35%	≤75%	≤100%	Total	Cuestionario para Diagnósticos de Mantenimiento	
					F	**Medición y Control del Mantenimiento**
					1	¿Se utilizan indicadores de seguimiento en todos los niveles de la estructura jerárquica?
					2	¿Existe un grupo de índices llamados KPI's (Key Performance Indicators)?
					3	¿Hay al menos un KPI en cada nivel de la organización?
					4	Los KPI's, ¿son entendidos por todos los colaboradores de Mantenimiento?
					5	¿Hay personal que dedica buena parte de su tiempo a la confección y actualización de KPI's?
					6	¿Existe un proceso formal de revisión de KPI's en todos los niveles de la organización?
					7	¿Se utilizan los resultados de los KPI's para tomar decisiones?
					8	¿Tiene cada KPI un responsable de su evolución?
					9	¿Son confiables los datos de formación para los indicadores y KPI's?
					10	¿Hay un solapamiento y alineación entre los indicadores y KPI's de los distintos niveles?
					11	¿Existen indicadores para medir la demora en el cumplimiento de las Órdenes de Trabajo?
					12	¿Existen indicadores para medir el impacto ambiental de toda actividad de Mantenimiento?
					13	¿Tiene la compañía una estructura de costos bien definida?
					14	¿Existe una estructura de costo estándar en Mantenimiento?
					15	¿Están los costos de mantenimiento incluidos en el Reporte Gerencial y en el de Ingeniería?
					16	¿Cree Ud. que los costos de mantenimiento pueden reducirse?
					17	¿Existe un reporte anual o semestral de Mantenimiento?
					18	El reporte anual o semestral de Mantenimiento, ¿incluye indicadores de gastos y presupuesto?
					19	¿Se confecciona un presupuesto de Parada Anual de Planta?
					20	¿Se utilizan indicadores de OEE, PTE, Rendimiento, Confiabilidad, Disponibilidad, etc.?
					21	¿Están debidamente actualizados, visibles y al alcance de todos?
					22	¿Se han llevado adelante estudios de análisis de riesgo?
					23	¿Existen KPI's compartidos entre Mantenimiento y Producción?
					24	¿Conocen los responsables de Mantenimiento los principales KPI's de Producción?

Figura 12.6.7
Cuestionario (F), Medición y Control del Mantenimiento.

En función de los resultados obtenidos, es posible establecer el estado de situación en cada una de las áreas o aspectos de interés. Sin embargo, casi con seguridad será necesario ajustar estos cuestionarios a las condiciones particulares de cada empresa pues habrá preguntas que no correspondan, otras que deberán modificarse y algunas que agregar.

Es interesante hacer algunos comentarios acerca del perfil de la persona que llevará a cabo la auditoria y calificará, finalmente, al área de Mantenimiento. En la medida de lo posible debería ser una persona ajena a la compañía (auditor externo). Esto le permitirá ser independiente en su apreciación. Debe ser alguien con experiencia en el área industrial para comprender la problemática y las particularidades del Mantenimiento. Su perfil debe ser ameno, aunque mantener una conducta independiente. No debe sentirse presionado por el comentario de los auditados, sobre todo de aquellos que ocupan puestos de mayor jerarquía en la empresa. Debe ser alguien con gran capacidad de observación; muchos de los hallazgos que se descubren en una auditoría no provienen de las respuestas de los entrevistados.

Los auditados deben comprender y analizar los hallazgos de la auditoria; toda auditoria deja un aprendizaje. Se debe acordar un plan de acción que solucione efectivamente los problemas detectados.

Resumen de aplicación

12.1 Introducción

- *La aplicación de indicadores en el área de Mantenimiento permite, por un lado, conocer cuál es el estado actual de situación (la realidad) y saber si las estrategias y políticas vigentes son las apropiadas para el negocio. También, y si los indicadores son correctos, permite evidenciar las variaciones - para bien o mal - en la efectividad de los procesos y proponer alternativas de mejora para aquellos con mayor debilidad.*

- *La medición y control del mantenimiento deben ser permanentes; un seguimiento periódico de los indicadores, así como su ajuste y optimización, facilita el logro de resultados confiables y consistentes.*

- *Las organizaciones que escogen sus indicadores en base a un estudio profundo, proponen pocos y buenos, y los gestionan adecuadamente, alcanzan las metas y los objetivos buscados con toda seguridad. Que sean pocos, facilita el manejo y evita la dispersión; que sean buenos permite medir efectivamente el rendimiento de cada proceso.*

12.1.1 Implementación de Indicadores

- *La elección, diseño, implementación y optimización de los índices de gestión, es responsabilidad de Ingeniería de Mantenimiento. Los objetivos de cada indicador deben revisarse regularmente.*

- *Resulta muy importante definir el alcance de un indicador. Una cosa es medir la disponibilidad de una máquina aislada del contexto de funcionamiento y otra muy distinta medir la disponibilidad de todo un proceso de transformación.*

- *En la frecuencia de monitoreo de los indicadores influye la estabilidad del proceso (si el proceso es muy inestable, la frecuencia debe aumentar). Además, es importante la consecuencia del potencial desvío del proceso medido. Si una leve variación en las variables tiene serias consecuencias colaterales, entonces la frecuencia de monitoreo debe ser mayor para tener tiempo suficiente de tomar alguna medida.*

12.1.2 Propiedades que deben satisfacer los Indicadores

- *Las siguientes son algunas propiedades que todo indicador debe cumplir.*

  Medir procesos que efectivamente sean necesarios de controlar y mejorar.
  Ser sensible a los cambios del proceso que mide.
  Ser confiable para poder tomar decisiones de importancia.
  Permitir que se focalicen los puntos de mayor debilidad del proceso medido.
  Satisfacer las perspectivas de los responsables del indicador.
  Estar alineado con los objetivos corporativos (Empresa y Mantenimiento).
  Tener baja dificultad de cálculo.
  Tener baja dificultad de comprensión.
  Ser atractivo para los involucrados en el proceso (colaboradores).

12.2 Agrupación y Clasificación

- *La primera clasificación sugerida es el GRUPO, para indicar si el indicador pertenece a los rubros Gestión Operativa, Gestión de Órdenes de Trabajo (OT), etc. A su vez, y dentro de cada grupo, se clasifican los indicadores según tres características. La primera es el NIVEL, para indicar el estrato jerárquico que más*

lo utiliza como herramienta de gestión. Luego, y siendo que un indicador puede medir estado de situación, eficacia, eficiencia o efectividad, se los clasifica por TIPO usando las siglas S, E, EE y EEE respectivamente. Por último, se refiere el grado de dificultad para el cálculo a través de la categoría DIFICULTAD.

- *Entendemos por eficacia la capacidad de cumplir con un objetivo determinado, es una medida del logro de los resultados. La eficiencia es el cumplimiento del objetivo con el mínimo de recursos, se enfoca a utilizar dichos recursos (materiales, talentos, dinero, tiempo, volumen, etc.) de la mejor manera posible. La efectividad, por su parte, es el equilibrio o combinación de la eficacia y la eficiencia; un proceso eficaz y eficiente será, con toda seguridad, también efectivo.*

- *La cascada de indicadores debe comenzar por los objetivos primarios de la organización y luego abrirse en objetivos secundarios y consecuentes con los primeros. En un árbol de indicadores debe existir un hilo conductor continuo entre los niveles superiores e inferiores.*

- *Por ejemplo, el gasto de mantenimiento puede ser un indicador de nivel gerencial y cada uno de los niveles inferiores de la estructura contribuir a éste a través del cumplimiento de sus funciones específicas (cuyo seguimiento se hará, también, con otros indicadores). A través del seguimiento de indicadores de tarifas o desempeño de terceros, un gerente de mantenimiento puede optar por la mejor decisión en cuanto a la contratación de servicios. A su vez, un operario mecánico contribuye a la meta del sector sustituyendo eficaz y eficientemente los repuestos que reemplaza (su desempeño puede medirse con indicadores de cumplimiento de órdenes de trabajo o con cantidad de re-trabajos).*

12.3 Desarrollo de Indicadores

- *La efectividad de un indicador depende de quién, para qué y cómo lo aplique. Además, un único indicador no es suficiente para tomar decisiones. Es conveniente trabajar con un paquete o conjunto de indicadores sistémicos que evalúen la realidad integralmente.*

- *Todos los indicadores sugeridos son referenciales y deben modificarse y adaptarse de acuerdo a las necesidades, objetivos y metas de la organización que los requiera.*

12.3.1 Gestión Operativa

- *Muchos de los índices de este grupo ya se analizaron en capítulos anteriores. Algunos de ellos se refieren a medidores de desempeño operativo de un activo o conjunto de activos como la disponibilidad y la confiabilidad (Capítulo 1). Otros, tratan aspectos de efectividad global de equipos como los vistos en el Capítulo 7. Ver tabla de la figura 12.3.1.*

12.3.2 Gestión de Órdenes de Trabajo

- *Estos indicadores, y los reportes que pueden generarse a partir de ellos, permiten evaluar la capacidad de planificación y programación del área de mantenimiento. También evidencian las fortalezas y debilidades de los procesos del sector. Ver figura 12.3.2.*

12.3.3 Mantenimiento

- *Estos índices permiten evaluar la efectividad de las estrategias utilizadas para evitar o minimizar las consecuencias de los modos de falla.*

- *Para las rutinas preventivas los indicadores deben evaluar la capacidad de la estrategia para eliminar fallos imprevistos en el período de previsibilidad (parte central de la curva de la bañera) con la mejor relación costo - beneficio.*

- *Para las tareas basadas en condición (mantenimiento predictivo y proactivo) se busca determinar si las inspecciones son lo suficientemente válidas para identificar fallas sintomáticas la mayoría de las veces que éstas ocurren (confiabilidad de la técnica aplicada), así como la relación entre lo previsto que insumiría la técnica (dinero, tiempo, etc.) y lo que efectivamente insumió.*

- *Para el caso del mantenimiento detectivo, la efectividad de la estrategia y de la acción para cumplirla (en el modo de falla del dispositivo redundante o de protección) quedan determinadas por las veces que ocurrió un fallo simultáneo.*

- *Ver figura 12.3.3.*

12.3.4 Gestión de Repuestos (Inventario)

- *Los indicadores de gestión de repuestos permiten evaluar, entre otras cosas, las diferencias en el stock físico del Almacén, la gravedad de los desvíos como diferencia en los montos de los ítems desviados, la efectividad en el proceso de administración de existencias, los retrasos o demoras en la entrega de repuestos, etc. Ver figura 12.3.4.*

12.3.5 Gestión de Mejoras

- *Estos índices son mayormente usados a nivel Gerencial o de Jefe de Mantenimiento. Tienen en cuenta los aspectos estratégicos del negocio.*

- *También se reúnen indicadores específicos que evalúan los beneficios de aplicar herramientas o metodologías de mejora como el RCM y el TPM. Ver figura 12.3.5.*

12.3.6 Personal

- *Estos indicadores deben elaborarse e implementarse conjuntamente entre los responsables de Mantenimiento y Recursos Humanos. Un indicador que se destaca es "FTE" (Full Total Equivalent). Su aplicación debe ser muy cuidadosa porque errores de apreciación pueden derivar en conclusiones equivocadas. Ver figura 12.3.6.*

12.3.7 Seguridad y Medio Ambiente

- *Este grupo de indicadores permite medir la eficiencia de las acciones de mantenimiento en relación a la prevención de accidentes y cuidado del medio ambiente. Ver figura 12.3.7.*

12.3.8 Gestión de Gastos / Costos

- *El seguimiento de índices económicos tiene como principal objetivo responder a las expectativas de los accionistas e inversores.*

- *Al igual de lo que ocurre con el resto de los indicadores un reporte de gastos debe reflejar el estado situacional de las principales variables económicas que se desean controlar, comparándolas con períodos anteriores o valores de referencia como el presupuesto.*

- *Los indicadores que relacionan el gasto de mantenimiento con otros índices deben:*

  Utilizarse para evaluar tendencias propias.
  Calcularse en forma anualizada, evitando las estacionalidades.
  Tener en cuenta aspectos de contexto como volumen productivo, tecnología, ubicación geográfica de

la unidad productiva, etc.
Usarse para hacer estudios de benchmarking sólo si el negocio o los procesos medidos son ciertamente comparables.

- *Todos los indicadores de este grupo deben aplicarse muy cuidadosamente y con un alto grado de compromiso y profesionalismo por parte de los responsables.*

Ver figura 12.3.8.

12.4 Tableros de Control de Mantenimiento

- *Un Tablero de Control (TC) permite, en primera instancia, identificar las zonas de oportunidad y las áreas potencialmente factibles de mejorar. Además, despoja suposiciones (hechos que se aceptan como válidos y entendidos aunque no lo sean).*

- *El grupo de indicadores de cada tablero debe divulgar la misión y los objetivos estratégicos de la organización. El seguimiento de los índices y el intercambio de opiniones que sobre éstos se haga, sirven para coordinar las iniciativas individuales y fomentar el accionar conjunto de las personas (fomenta la participación y el compromiso).*

- *Siempre es aconsejable que los tableros estén acompañados de gráficos de tendencias en relación a valores históricos o referenciales (ver figura 12.4.4). Un gráfico resume información y permite entender la evolución de las variables, convierte datos en información.*

- *Los tableros deben incluir un procesamiento temporal; esto es: mirar hacia atrás, mostrar los valores actuales y pronosticar, lo más acertadamente posible, la tendencia futura del proceso.*

- *El principal desafío al confeccionar un tablero es lograr que tenga la mayor cantidad de información y la menor cantidad de datos.*

- *Cada TC (independientemente del nivel del observador) tendrá entre sus índices algunos de mayor importancia. A éstos se los llama KPI (Key Performance Indicators).*

- *Por lo general, el área de mantenimiento estandariza tres tableros. Uno conocido como Tablero Gerencial que contiene básicamente índices de efectividad vinculados a la Gestión de Gastos / Costos, Personal y Seguridad y Medio Ambiente. Luego, el Tablero de Ingeniería de Mantenimiento agrupa aquellos índices vinculados a gastos, desempeño operativo del sector, distribución de recursos y fuerza laboral, etc. Por último, cada taller u oficina tiene su Tablero Operativo que incluye indicadores de Gestión Operativa a nivel de activos y algunos índices de gestión de personal y seguridad. Ver figuras 12.4.1, 12.4.2 y 12.4.3.*

- *Cabe hacerse las siguientes preguntas al momento de armar un Tablero de Control:*

  ¿Se medirá realmente lo necesario para gestionar el sector? No medir procesos intrascendentes que no aportan valor a la gestión integral y corporativa.
  ¿No se medirá de más ni de menos? No dilapidar recursos ni escatimarlos si el beneficio lo justifica.
  ¿Son confiables los datos de formación? Hacer seguimiento de estimaciones no agrega valor.
  ¿Los indicadores son los necesarios para cada nivel de la estructura? Un técnico de mantenimiento no necesita los mismos indicadores que un gerente, y viceversa.
  ¿La información está disponible para quien la necesita?, ¿llega a quién la necesita? Debe procurarse que la información no descanse en un archivo que nadie lee.
  ¿Las personas que generan datos y/o información, saben para qué sirven?

12.4.1 Reporte Gerencial

- *Cada uno de los índices de este reporte debe representar la misión y los objetivos corporativos del negocio. También tendrán en cuenta los aspectos financieros y económicos de la empresa y las cuestiones de seguridad personal y cuidado del medio ambiente.*

- *Algunos de los indicadores más utilizados a nivel gerencial son:*

  Cumplimiento del presupuesto de mantenimiento.
  Gasto total de mantenimiento.
  Costo específico de mantenimiento.
  Relación entre los gastos de mantenimiento por mano de obra y materiales.
  Tasa de accidentes e incidentes.
  Productividad de alguna línea o unidad operativa en particular.
  Cumplimiento de las actividades planificadas por el área.
  Nivel de inventario inmovilizado de repuestos.

12.4.2 Reporte Corporativo (o de Divulgación)

- *Algunas compañías confeccionan reportes de divulgación o publicación que pueden contener los siguientes índices:*

  Consumo de algún recurso no renovable.
  Tasa de accidentes.
  Tasa de incidentes ambientales.
  Índice de antigüedad.
  Índice de capacitación.
  Consumo de energía o combustibles.
  Obras de ayuda a la comunidad.

12.4.3 Reporte de Ingeniería de Mantenimiento

- *Este conjunto de indicadores debe reflejar el desempeño y la efectividad de las actividades impulsadas por Mantenimiento. Se analiza semanalmente en una reunión con la participación del Gerente, Ingeniero y Jefe de Mantenimiento (ocasionalmente Supervisores y Programadores). Se busca cumplir con metas y objetivos.*

- *El Tablero puede contener:*

  Gasto total de mantenimiento.
  Evolución de la gestión global y cumplimiento de ADF's.
  Productividad de alguna línea o unidad operativa en particular.
  Cumplimiento de las actividades planificadas de Mantenimiento.
  Índice de cumplimiento de pedidos de trabajo.
  Tasa de accidentes e incidentes (de suceder, revisar las tasas individuales).
  Avance de los planes de mejora (RCM, TPM, RCA, etc.).
  Demoras en la entrega de materiales (Almacén de Repuestos).
  Efectividad de los distintos tipos de mantenimientos pro-activos.

12.4.4 Reporte Operativo

- *Dentro de los índices que contiene este tipo de reportes, encontramos:*

  Disponibilidad de equipos o unidades operacionales.
  Confiabilidad de sistemas.
  Tasa de ausentismo.
  Índice de horas extras.
  Backlog de Órdenes de Trabajo.
  Efectividad de los distintos tipos de mantenimiento.
  Demora en la atención de pedidos de trabajo.

12.5 Mejorar a partir de la medición diaria

- *El proceso de gestión diaria de mantenimiento (GDM) es uno de los más importantes para el éxito de la gestión de activos. También llamado DMM (del inglés, Daily Management Maintenance) consiste en propiciar un ámbito cotidiano de identificación y resolución de problemas.*

- *A las reuniones de DMM (nunca más de 45 minutos) deben acudir Supervisores, Jefes, Analistas, Programadores e Ingenieros de Mantenimiento, cada uno con un objetivo específico.*

- *Sus obligaciones se resumen a continuación:*

  ***Supervisores**. Exponer las novedades operativas y las consecuencias que éstas produjeron en el sistema productivo. Tiempo aproximado, 15 minutos.*

  ***Jefes**. Colaborar en la solución técnica de averías. Dar respuesta a las inquietudes planteadas por los Supervisores. Exponer el Tablero Operativo con la ayuda de los Ingenieros de Mantenimiento. Tiempo aproximado, 15 minutos.*

  ***Analistas y Programadores**. Preparar la información necesaria (reportes, registros, listados, gráficos, etc.). Registrar los fallos ocurridos para estudiar en detalle el progreso de averías y evitar su recurrencia. Impulsar ADF's. Tiempo aproximado, 5 minutos.*

  ***Ingenieros de Mantenimiento**. Proponer alternativas de mejora para los resultados no positivos del Tablero de Control Operativo. Explicar el impacto de cada falla y priorizar las acciones de mejora en la que trabajarán Analistas y Programadores. Transmitir las políticas corporativas de interés general (Seguridad y Medio Ambiente, Capacitación, Eventos, Remuneración, etc.). Informar sobre los KPI's corporativos. Tiempo aproximado, 10 minutos.*

  ***Especialistas Mantenedores**. En ocasiones puede ser necesaria la participación de algún especialista para explicar bajo qué circunstancias se produjeron los fallos, cómo se realizó cierta reparación o cualquier evento de interés general.*

12.6 Diagnósticos de Mantenimiento

- *Cuando la situación de un área de mantenimiento da indicios de un desempeño insatisfactorio, o cuando es necesario evaluar un departamento de mantenimiento, se presenta la posibilidad de realizar un diagnóstico que permita descubrir las zonas débiles así como las oportunidades de mejora.*

- *La tabla de la figura 12.6.1 muestra un conjunto de preguntas útiles para determinar el estado situacional del área de mantenimiento desde un punto de vista general.*

- *Para hacer un estudio más profundo de la situación puede aplicarse un paquete de cuestionarios. La tabla de la figura 12.6.2 indaga puntualmente los aspectos de planificación del mantenimiento. Por su parte, la tabla de la figura 12.6.3 hace lo propio con el Sistema de Gestión desarrollado en el área de mantenimiento. La tabla de la figura 12.6.4 permite determinar el nivel de profundidad alcanzado por los procesos de mejora. El cuestionario de la tabla 12.6.5 evalúa la situación de la gestión de repuestos y materiales técnicos del Almacén. La tabla de la figura 12.6.6 establece el grado de optimización de la estructura organizativa del área de mantenimiento. Por último, la tabla de la figura 12.6.7 trata sobre el control y medición del mantenimiento.*

- *En función de los resultados obtenidos de estos cuestionarios, es posible establecer el estado de situación en cada una de las áreas o aspectos de interés. Siempre resultará necesario ajustar las preguntas a las condiciones particulares de cada empresa.*

- *La persona que lleve adelante las auditorias debe ser ajena a la compañía (auditor externo). Esto le permitirá ser independiente en su apreciación. Debe ser alguien con experiencia en el área industrial para comprender la problemática y las particularidades del Mantenimiento. Su perfil debe ser ameno, aunque mantener una conducta independiente. No debe sentirse presionado por el comentario de los auditados, sobre todo de aquellos que ocupan puestos de mayor jerarquía en la empresa. Debe ser alguien con gran capacidad de observación; muchos de los hallazgos que se descubren en una auditoría no provienen de las respuestas de los entrevistados.*

Anexos

Anexo I
Estimación del intervalo $\Delta t_{SFprimario}$

Tecnología	Parámetro, Ensayo o Falla Sintomática	Frecuencia Inicial ($\Delta t_{SF\ primario}$)
Análisis de Vibraciones	Desalineación / Desbalanceo / Resonancia	1 a 3 meses
	Fallas sintomáticas en pequeñas masas	1 mes
	Solturas y Flojedades / Excentricidad	1 a 2 meses
	Rodamientos de baja y media velocidad	2 meses
	Rodamientos de alta velocidad	1 mes
	Engranajes	3 meses
Termografía	Subestaciones de media y alta tensión	6 meses
	Distribución eléctrica de media y alta tensión	1 año
	Distribución eléctrica de baja tensión	6 meses
	Contactores, reles, interruptores, etc.	6 meses
	Colectores de vapor, válvulas y trampas	3 a 6 meses
	Motores eléctricos	3 a 6 meses
	Transformadores	6 meses
	Rodamientos y sistemas mecánicos	2 a 3 meses
	Materiales refractarios / Aislantes	6 meses a 1 año*
Análisis de Aceites	Propiedades Físicas	6 meses a 1 año*
	Propiedades Químicas	6 meses a 1 año*
	Análisis espectrométrico	6 meses a 1 año*
	Contaminantes	6 meses
	Ferrografía analítica	6 meses
	Rigidez dieléctrica (ASTM D-1816)	6 meses a 1 año*
	Tensión interfacial (ASTM D-2285)	1 año
	Agua en aceites dieléctricos (ASTM D-1533)	6 meses a 1 año*
	Conteo de partículas (ISO 4406)	6 meses
	Gases disueltos en aceites de transformador (IEC 60567 / 60599)	6 meses a 1 año*
	Productos derivados de la celulosa en los aceites de transformadores (ASTM D-5837)	2 años
Ensayos Sensoriales para Aceites	Ensayo con papel secante	2 meses
	Prueba de sedimentación	3 meses
	Prueba de tapón o trampa magnética (partículas ferrosas)	3 meses
	Inspección de color (ASTM D-1524)	2 meses
	Ensayo de crepitado	3 a 6 meses
	Prueba de olor	2 meses
	Inspección de filtros	1 mes*
Emisión Acústica	Inspecciones generales y cañerías	6 meses*
	Inspección de recipientes API	3 a 5 años
	Inspección de recipientes a presión o vacío	1 a 3 años*
Ultrasonido	Cañerías, circuitos, tanques, etc.	6 meses a 1 año*
	Calderas, intercambiadores, etc.	1 año
	Compresores, ventiladores, etc.	6 meses a 1 año*
	Inspección de motores y compresores	6 meses a 1 año*
	Inspección de válvulas y trampas de vapor	3 meses a 1 años*
	Inspección por Eco Ondas	6 meses a 1 año*
	Medición de espesores	1 año*
Tintas penetrantes	Aceptación de componentes	Discrecional
	Estructuras portantes de estructuras metálicas	1 año
	Detección de fisuras	1 año*
	Recipientes a presión / vacío	1 a 3 años*
Ensayos Eléctricos en MEI	Factor de Potencia	6 meses
	Megado de motores	6 meses a 1 año*
	Calidad en la energía eléctrica	3 meses*
	Resistencia entre fases	3 meses*
	Inductancia y Capacitancia entre fases	3 meses*
	Voltaje y Corriente de fases	3 meses
	Corriente de arranque	3 meses
	Indice de Polarización	3 meses

* Según contexto operativo, modo de falla y aplicación

Tabla I Anexo I.

Anexo II
Valor Eficaz ó RMS

El valor **RMS** (root mean square – raíz media cuadrática) se usa para medir la energía efectiva de una señal vibratoria, constituida esta última por múltiples señales de distintas frecuencias. Para una onda senoidal pura, el valor RMS es 0.707 ($\sqrt{2}$ / 2) del valor pico. Se considera, también, una medida de la potencia de la señal vibratoria completa y depende del valor pico y forma de la señal.

Por ejemplo, el valor RMS de una corriente alterna es el valor de corriente continua que produciría la misma disipación de calor.

$$RMS_{(x)} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t)\, dt \right]^{1/2} \qquad \text{(II-1)}$$

El intervalo T de integración debe ser mayor al periodo (T) de la componente de menor frecuencia de la señal.

La relación entre los valores **RMS, Pico** y **Promedio** de una señal senoidal se resume en la tabla siguiente.

V_{RMS}	V_{Pico} . 0.707
V_{Pico}	V_{RMS} / 0.707
$V_{Promedio}$	V_{Pico} . 0.636
V_{RMS}	$V_{Promedio}$. 1.11
$V_{Promedio}$	V_{RMS} . 0.9

Tabla I Anexo II.

El valor Pico (V_{Pico}) es el máximo valor de una señal. A su vez, el valor promedio ($V_{Promedio}$) es el valor medio de la señal calculado durante un intervalo de tiempo T. Las señales cuyo valor medio es nulo, deben ser rectificadas antes de calcular el valor promedio.

O bien,

$$V_{Promedio(x)} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|\, dt \qquad \text{(II-2)}$$

Anexo III
Estándares y Especificaciones útiles para Vibraciones Mecánicas

El siguiente Anexo resume los cometarios y datos más relevantes de los estándares más utilizados para evaluar la severidad vibratoria en diferentes tipos de máquinas rotantes. Los mismos proponen datos referenciales que deberán ratificarse en la práctica para cada máquina dentro de su contexto operativo.

Aunque una máquina rotante manifieste valores de vibración "normales" según la norma, aún puede sufrir daños imprevistos en la operación.

ISO 1940

Se refiere a la calidad del balanceo de rotores. Las máquinas rotantes (aún en condición de operación normal) manifiestan cierto nivel de desbalanceo (fuerza centrífuga), conocido como desbalanceo residual. La norma establece la tolerancia permitida, para dicho desbalanceo, durante las tareas de balanceo.

ISO 2372

Es de carácter general para máquinas rotantes que operan entre 10 y 200 rev/seg. Se usa para cuantificar la severidad de sus vibraciones. Se estudian los valores RMS en velocidad medidos en distintos puntos de la superficie de la máquina y para el rango de frecuencias 10 - 1.000 Hz. Las lecturas se toman como válidas cuando la máquina alcanzó el régimen estacionario de trabajo (temperatura, carga, velocidad, etc.). Propone efectuar mediciones Radiales y Axiales. Para equipos que operan a velocidades variables, la lectura aceptada es aquella registrada cuando la máquina funciona en su condición más extrema.

Nota: Si la primera velocidad crítica del sistema es inferior a su frecuencia principal de excitación (por lo general la frecuencia de rotación), se dice que el soporte es flexible. Por el contrario, cuando la primera velocidad crítica es mayor que su frecuencia principal de excitación, se dice que el soporte es rígido.

La norma clasifica a las máquinas en 6 categorías, según el siguiente cuadro.

CLASE I	Máquinas hasta 15 kW.
CLASE II	Máquinas medianas con potencia de entre 15 y 75 kW, o máquinas montadas con cimientos rígidos hasta 300 kW.
CLASE III	Máquinas con potencia mayor a los 300 kW y montadas con cimientos *rígidos*.
CLASE IV	Máquinas con potencia mayor a los 300 kW y montadas con cimientos *flexibles*. Ejemplo, turbomáquinas.
CLASE V	Sistemas conductores robustos con fuerzas de inercia no balanceadas y montados en fundaciones relativamente *rígidas*.
CLASE VI	Máquinas o sistemas conductores con fuerzas de inercia no desbalanceadas, montados en fundaciones medianamente *elásticas*. Ejemplo, vibradores, centrífugas de proceso, etc.

Tabla I Anexo III.

La tabla II se refiere a máquinas cuya clase se encuentra entre I y IV.

Velocidad Efectiva - RMS (mm/seg)	Velocidad 0- pK (mm/seg)	Tipos de Máquinas			
		Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 - 0,28	0,127 - 0,396	A	A	A	A
0,28 - 0,45	0,396 - 0,636				
0,45 - 0,71	0,636 - 1,004				
0,71 - 1,12	1,004 - 1,584	B	B		
1,12 - 1,8	1,584 - 2,546				
1,8 - 2,8	2,546 - 3,96	C	C	B	B
2,8 - 4,5	3,96 - 6,36				
4,5 - 7,1	6,36 - 10,04	D	D	C	C
7,1 - 11,2	10,04 - 15,84				
11,2 - 18	15,84 - 25,46			D	D
18-28	25,46 - 39,60				
28-45	39,60 - 63,64				
45-71	63,64 - 100,41				
A: Buena	C: Insatisfactoria				
B: Satisfactoria	D: Inaceptable.				

Tabla II Anexo III.

Según esta norma, la unidad fundamental para cuantificar la severidad vibratoria es la magnitud **RMS de Velocidad en mm/seg**, para un rango de frecuencias de 10 a 1.000 Hz.

Si el valor RMS medido califica a la máquina como A, se considera que la misma se encuentra en buen estado para operar. Contrariamente, si la energía vibratoria indica un nivel D, es de esperar un inaceptable estado de condición básica que a la postre dañe los componentes del sistema.

ISO 2373

Esta norma se utiliza en máquinas eléctricas de corriente continua o de corriente alterna trifásica cuya altura de ejes está comprendida entre 80 y 400 mm. La severidad de la vibración se mide en RMS de velocidad [mm/s ó in/s] y el rango de frecuencias exigido es 10 - 1.000 Hz. Las lecturas de comprobación deben hacerse con la máquina funcionando, sin carga y a velocidad nominal, para asegurar la repetibilidad de los resultados. Para el caso de equipos con velocidades de operación variables, sugiere efectuar varias mediciones a distintas velocidades. Existen, además, otras recomendaciones para el montaje de prueba, referidas a la flexibilidad de los soportes del bastidor porta motor.

Además, la norma recomienda tres mediciones ortogonales por punto, dos radiales y una axial.

Calidad	Velocidad	Valor RMS máximo en Velocidad para distintas alturas de eje H (mm).					
		80 ≤ H ≤ 132		132 < H ≤ 225		225 < H ≤ 400	
	rpm	mm/s	in/s	mm/s	in/s	mm/s	in/s
N (Normal)	600 a 3.600	1.8	0.071	2.8	0.11	4.5	0.177
R (Reducido)	600 a 1.800	0.71	0.028	1.12	0.044	1.8	0.071
	1.800 a 3.600	1.12	0.044	1.8	0.071	2.8	0.11
S (Especial)	600 a 1.800	0.45	0.018	0.71	0.028	1.12	0.044
	1.800 a 3.600	0.71	0.028	1.12	0.044	1.8	0.071

Tabla III Anexo III.

En la tabla III se identifican las tres zonas de severidad. Sin embargo, una máquina con grado de calidad *normal* (N) puede manifestar alta vibración durante el funcionamiento en su contexto operativo, debido a factores externos como flojedades, fallas en los cimientos, fallas en los equipos conducidos que se transmiten al motor, etc.

ISO 10816

La norma, en su totalidad, se divide en seis **Partes**. La primera parte trata acerca de los lineamientos generales de la norma. Las demás, hacen referencia a los distintos tipos de máquinas: turbinas de gas, estaciones de bombeo, motores y máquinas industriales, máquinas reciprocantes, etc. También se utiliza en pruebas de aceptación como estándar de condición básica para equipos nuevos o reparados.

Establece la severidad de las anomalías vibratorias de las máquinas según dos criterios diferentes. El primer criterio considera el **valor** (magnitud) de la vibración global; el segundo, las **variaciones** de dicho valor.

Para el primer criterio existen, además, cuatro zonas de severidad (A, B, C y D) y cada una con su límite para el valor de vibración. La lectura máxima por punto permite conocer la severidad según el tipo de máquina y soporte. El criterio de flexibilidad para los soportes, es similar al mencionado en la norma **ISO 2372.**[1] El requerimiento de medición es el valor de desplazamiento o velocidad en RMS, en un rango de frecuencias que va de 10 a 1.000 Hz. La norma también recomienda mediciones radiales y axiales, y puede aplicarse a equipos horizontales o verticales.

La tabla IV, por ejemplo, muestra los límites tolerables para *máquinas rotatorias de más de 300 kW y máquinas eléctricas con altura de ejes de más de 315 mm.*

---

1 En todos los casos para una clasificación y evaluación adecuada, se recomienda consultar las normas mencionadas.

Desplazamiento RMS (µm)	Velocidad RMS (mm/seg)	Tipos de Soporte	
		Rígido	Flexible
< 29	< 2,3	A	A
29 - 45	2,3 - 3,5	B	
45 - 57	3,5 - 4,5		B
57 - 90	4,5 - 7,1	C	
90 - 140	7,1 - 11,0	D	C
> 140	> 11,0		D
A: Buena	C: Insatisfactoria		
B: Satisfactoria	D: Inaceptable.		

Tabla IV Anexo III.

Por su parte, la tabla V hace lo propio para *máquinas con potencias de entre 15 y 300 kW* y *máquinas eléctricas con alturas de ejes de 160 a 315 mm.*

Desplazamiento RMS (µm)	Velocidad RMS (mm/seg)	Tipos de Soporte	
		Rígido	Flexible
< 22	< 1,4	A	A
22 - 37	1,4 - 2,3	B	
37 - 45	2,3 - 2,8		B
45 - 71	2,8 - 4,5	C	
71 - 113	4,5 - 7,1	D	C
> 113	> 7,1		D
A: Buena	C: Insatisfactoria		
B: Satisfactoria	D: Inaceptable		

Tabla V Anexo III.

El segundo criterio se refiere a las variaciones del valor de la vibración. En función del criterio anterior, y bajo las mismas condiciones de medición (10 a 1.000 Hz), se determina si en la máquina sucedió una variación significativa en las magnitudes medidas respecto a un valor referencial. Este criterio considera los cambios relativos en las mediciones, sin tener en cuenta el valor absoluto que pudieran alcanzar. Por lo general, se toma como valor de alerta un 25% más del valor referencial de buen funcionamiento.

Los cambios relativos aplican tanto para la medición RMS de velocidad como de desplazamiento.

Anexo IV
Ensayos ASTM D y otras pruebas para Análisis de Aceites y Grasas

En la tabla I se describen brevemente algunas de las técnicas ASTM D que se utilizan para evaluar las propiedades de un fluido o semifluido lubricante.

Números ASTM de Ensayos Normalizados para Análisis de Aceites y Grasas		
Propiedad	Descripción	ASTM
Viscosidad cinemática	Viscosímetro de flujo capilar por gravedad (Ensayo Ostwald). Constante del instrumento por el tiempo de flujo. Se determina a 40 y 100 °C [cSt].	D-445
Viscosidad absoluta	Viscosímetro rotatorio (Brookfield). Posee un husillo cuyo torque indica la viscosidad en Centipoise [cP].	D-2983
Indice de viscosidad	Variación de la viscosidad entre 40 y 100 °C. En un monograma se vuelcan los valores de viscosidad a 40 y 100 °C y luego se traza un recta que una ambos puntos. Su intersección con una tercer recta determina el IV.	D-2270
Densidad	Hidrómetro. Define la densidad del aceite a 15,6 °C con respecto al agua [g/ml].	D-1298
Punto de inflamación	Temperatura a la que se inflama la superfice. Define las propiedades de inflamación y volatilidad a altas temperaturas. Probador Cleveland de copa abieta [°C].	D-92
	Prueba del punto de inflamación Probador Persky-Martens de copa cerrada [°C].	D-93
Autoignición	Temperatura a la que se produce la autoingnición del aceite [°C].	D 2155
Punto de congelación ó escurrimiento	Temperatura a la que se alcanzan los 22.000 cSt [°C]. Flujo por gravedad en un recipiente de prueba.	D-97 / IP15
TAN (potenciométrico)	Indice de acidez total. Determina todos los constituyentes ácidos del aceite. También se denomina número de neutralización potenciométrico [mgKOH/g].	D-664
SAN (Acidez Mineral)	Indice de acidez fuerte. Sólo determina el contenido de ácido mineral soluble en agua [mgKOH/g].	
TAN (calorimétrico)	Mide la concentración de ácidos orgánicos e indica el grado de envejecimiento del aceite o grasa [mgKOH/g].	D-974
TBN	Determina el índice de basicidad, contenido total de productos básicos [mgKOH/g].	D-5984 / D-2896
Residuo carbonoso	(Conradson). Residuo carbonoso [%].	D-189
Análisis de elementos	Indica la presencia de elementos inorgánicos que producen cenizas.	D-5185
Oxidación (RBOT)	Vida útil remanente del aceite. Ensayo acelerado en recipiente a presión, rango 30 a 1000 minutos. [Minutos ó % de vida remanente].	D-2272
Estabilidad a la oxidación (TOST)	El ensayo simula una celda que establece la estabilidad a la oxidación. Se evalúa la acidez y la formación de lodos.	D-943
Insolubles	(Insolubles en pentano e insolubles en tolueno) [%]. Indica la concentración de lacas y barnices, y la concentración de insolubles totales (sólidos).	D-893
Índice de saponificación	Indica la presencia de ácidos grasos vegetales o animales (aceites para sinfín y corona de bronce) [mgKOH/g].	D-94
Contenido de antioxidante	Indica el porcentaje remanente de aditivo antioxidante (Sólo para aceites inhibidos contra la oxidación) [%].	D-2668
Resistividad / Conductividad	Evaluación de la tendencia a la conductividad.	D-1169
Cenizas sulfatadas	Indica el porcentaje de cenizas provenientes de base y aditivos, después de la combustión o por la presencia de metales de desgaste [%].	D-874
Color	Variación del color por oxidación, falla térmica o contaminantes [Rango: de 0 a 8 y a intervalos de 0,5].	D-1500
	Variación del color por comparación contra un disco tabulado. Ensayo rápido de campo.	D-1524
Corrosión al Cobre	Envejecimiento artifical y forzado, o corrosión al cobre (3 horas a 100 °C). Mide la capacidad del aceite para inhibir el ataque al cobre [Rango: 1a a 4c]. (ASTM D-4048 para grasas lubricantes).	D-130
Espectrometría (EEA)	Análisis Espectrométrico (EEA). Identificación y determinación (concentración) de elementos, metalurgia o morfología. Útil para aditivos (antioxidantes y antidesgaste), partículas de desgaste (metales disueltos y partículas menores a 5 micrones) y contaminantes. [ppm].	D-6595
Gravedad específica	Indica el peso del aceite con relación al agua.	D-941
Estabilidad térmica	Mide el craqueo de aceites de transmisión térmica por co-destilación con arrastre de vapor de agua [%].	D-322
Agua	Karl Fisher para aceites industriales sintéticos (reductores y compresores). El azufre de los aditivos puede dar falso positivo [g/100g y ppm].	D-6304
	Porcentaje en volumen de agua (para bajos contenidos) [ml/100 ml].	D-95
	Karl Fisher. Permite obtener con gran exactitud muy bajas concentraciones de agua (desde 3 ppm). Muy útil para transformadores [ppm ó mg/Kg].	D-1533
Contenido de Glicol	Contenido de anticongelante en el aceite [%].	D-2982
Residuos	Residuos y sedimentos por centrifugación [% en volumen].	D-1796
Estabilidad hidrolítica	Resistencia a la degradación inducida por el agua.	D-2619
Dilución	Grado de dilución [% en volumen].	D-322
Tendencia a la espumación	Evaluación de la tendencia a la formación de espuma. Secuencia 1, 2 y 3 [ml / cm³]	D-892
Poder demulsificante	Determina la facilidad con que el aceite es capaz de separar el agua o evitar emulsiones. Se compara el porcentaje de agua separada con el porcentaje de emulsión a 80 °C y para aceites con viscosidad > 200 cSt. [%].	D-2711
	Eficiencia que posee el aceite para separarse del agua. Se mezclan y agitan dos partes iguales de agua y aceite a 54 °C; luego se mide el tiempo que tarda el aceite en separarse del agua en forma de agua, aceite y emulsión. Para aceites con viscosidad < 200 cSt. [minutos].	D-1401
Punto de fluidez	Identifica la temperatura más baja de fluidez del aceite [°C].	D-97
Antiherrumbre	Eficiencia de un aceite para resistir la herrumbre en superficies ferrosas [Pasa / No pasa].	D-665

* ASTM: American Society for Testing of Materials

Tabla I Anexo IV.

Números ASTM de Ensayos Normalizados para Análisis de Aceites y Grasas		
Propiedad	**Descripción**	**ASTM**
Rigidez dieléctrica	Mide el poder aislante del aceite. Determina la tensión en kV necesaria para hacer saltar una chispa entre dos electrodos ubicados a 2,5 mm entre sí y dentro de la muestra de aceite a una temperatura controlada. Se aplica un voltaje creciente de 5 kV/s (ASTM D-1816) ó 3 kV/s (ASTM D-877) [KV].	D-1816 / D-877 IRAM 2341
Tangente delta (δ)	Es una medida de las pérdidas de energía que ocurren en el transformador causadas por disipación en el aceite.	D-927 / IRAM 2340
Tensión interfacial	Método de la gota. Estima el grado de resistencia que ofrecen ambos líquidos (aceite-agua) a su separación [dinas/cm].	D-2285
	Método del anillo. Mide la fuerza de atracción entre moléculas de aceite-agua a través de la carga necesaria para desprender un anillo de platino de dicha interfase [dinas/cm].	D-971
Sustancias polares	Constituye una indicación prematura de la contaminación (agua, sólidos, etc.) o degradación del aceite.	D-1902
Gases disueltos	Separa los diferentes compuestos presentes en el lubricante en función de su punto de ebullición identificando los elementos que producen la degradación del aceite [ppm].	D-3612
Cromatografía líquida	La cromatografía líquida de alta presión permite identificar subproductos de la degradación de la celulosa presente en el papel, presspan o madera de los aislantes sólidos de transformadores (compuestos furánicos) [ppm].	D-5837
Capacidad de carga	El ensayo Timken® determina la capacidad de carga del lubricante (resistencia) dada por los aditivos EP, haciendo girar un aro lubricado y en contacto con un bloque de acero cargado [lb]. Se recomienda consultar la norma.	D-2509
Capacidad antidesgaste	Se utiliza el ensayo de 4 bolas para evaluar la capacidad antidesgaste de un lubricante. Consiste en hacer girar una bola cargada sobre otras tres bajo condiciones estandarizadas de temperatura, velocidad, tiempo y carga. Finalizado el ensayo se mide el diámetro de la impronta (scuffing o rayado) generada en las tres bolas inferiores [mm].	D-2266
Carga de soldadura	Determina la carga de soldadura de un aceite o grasa. Este método también utiliza el ensayo de 4 bolas sólo que bajo condiciones distintas de velocidad, carga, tiempo y temperatura [Kg].	D-2596 / D-2783
Consistencia	Mide cuán espesa es una grasa lubricante. Un cono normalizado se desliza por su propio peso y penetra en una muestra de grasa a 25 °C durante 5 segundos. Los milímetros que el cono penetra en la muestra, indican su consistencia. Se aplica en grasas sin uso o en grasas "trabajadas por enayo" [mm]. Los milímetros determinan el código de consistencia NLGI.	D-217
Punto de gota	Es la temperatura a la cual una grasa pasa del estado semilíquido al líquido [°C].	D-2265
Sangrado	Establece la cantidad de aceite que se separa de una grasa almacenada [%].	D-1742
Viscosidad aparente	Se utiliza para medir la capacidad a fluir (bombeabilidad) de una grasa [lb].	D-1072
	Mide la capacidad a fluir de una grasa a bajas temperaturas (-54 °C) [lb].	D-1478
Lavado por agua	Determina la resistencia de una grasa al lavado por agua; el ensayo se realiza mezclando la grasa con cierto porcentaje de agua y cuantificando la pérdida de ésta [gr].	D-1263
Resistencia al agua	Mide la resistencia al agua de una grasa en servicio. El ensayo hace pasar una corriente de agua sobre un cojinete antifricción lubricado con la grasa estudiada. Todos los parámetros (temperatura, tiempo y caudal) están normalizados. Se pesa la cantidad de grasa perdida al final del ensayo [gr].	D-1264
* ASTM: American Society for Testing of Materials		

Tabla I Anexo IV (Continuación).

Otras Pruebas y Métodos

Otras Pruebas		
Propiedad	**Descripción**	**Observaciones**
Conteo de Partículas	El ensayo permite determinar el nivel de limpieza (o contaminación) con partículas. Los métodos utilizados incluyen instrumentos ópticos, de presión diferencial, láser o conteo manual (filtración graduada o prueba del "parche").	ISO 4406
Prueba de gota [1]	El Blotter Test se utiliza para determinar dispersancia e insolubles de la oxidación. También conocido como ensayo de la mancha, se utiliza para analizar aceites usados en motores de combustión interna. Identifica el exceso de carbonilla (hollín), que es principalmente el combustible no quemado durante la combustión y transformado en partículas de carbón. Permite evaluar subjetivamente la capacidad remanente del dispersante; y, con cierta experiencia, detectar glicol en el aceite.	Laboratorio / Campo
Filtrabilidad	Tendencia del aceite y sus aditivos a flocularse y presipitarse en presencia de agua.	
Agua emulsionada	Ensayo de Crepitado. Consiste en calentar una plancha de acero a 180 °C y verter sobre ella dos gotas de aceite. Si el efecto es un violento burbujeo y ruido a "frito", se dice que en el aceite hay más de 0,3% de agua.	Campo
Ferrografía analítica	Esta técnica diferencia el tipo de material de las partículas y determina su fuente. Evalúa tamaño, tipo, concentración (aproximada), distribución y morfología. Consiste en pasar el aceite diluido a través de una placa (ferrograma) de vidrio bajo la acción de un campo magnético. Las partículas se ordenan a lo largo de la placa según su tamaño. Luego, se observa con microscópico usando filtros polarizados. Por ejemplo, las laminillas de metal con aspecto descascarado, largo y fino, por lo general indican problemas en rodamientos. Por su parte, los oxidos rojos generalmente obedecen a corrosión. Esta técnica es efectiva para partículas mayores a 5µ.	Laboratorio
Análisis de densidad ferrosa	Existen varias tecnologías (ferrografía de lectura directa, conteo de partículas ferrosas, etc.). Su principio de funcionamiento se basa en una trampa magnética y permite determinar tamaño, metalurgia y concentración de partículas mayores a 2µ.	Laboratorio
Monitoreo Molecular Óptico (FTIR)	FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier) proporciona un medio rápido de monitoreo de múltiples parámetros del lubricante, salud del aceite base, condición de los aditivos y contaminantes. Se hace pasar el aceite por un capilar, generalmente de 100 micrones, para que sus moléculas se exciten cuando simultáneamente se aplica luz infrarroja. En la parte opuesta del instrumento existe un detector de IR y un ordenador grafica la Absorbancia (a la frecuencia del espectro) en función del número de onda. Así, habrá picos (a diferentes números de onda) para antioxidantes, agua, hollín, anticongelante (glicol), oxidación, combustible, sulfatación, nitración, compuestos antidegastes, etc. La aparición de picos al número de onda característico de cada elemento, indica la presencia de éste. Siempre se toma como referencia la medición de un aceite nuevo.	Laboratorio

Nota: Ver www.lantos.com.ar

Tabla II Anexo IV.

Anexo V
Clasificación AGMA para lubricantes de transmisión

Equivalencias Grado AGMA (Aceites de Transmisión)				
Lubricantes R&O	Lubricantes EP	Grado ISO	Viscosidad aprox. a 40 °C [sCt]	
			Mínimo	Máximo
1	--	46	41,2	50,3
2	2 EP	68	61,1	74,5
3	3 EP	100	89,7	109,2
4	4 EP	150	134	164
5	5 EP	220	197	241
6	6 EP	320	286	350
7	7 EP	460	412	504
8	8 EP	680	610	746
8A	8A EP	1000	898	1100

Tabla I Anexo V.

Los lubricantes R&O (rust and oxidation inhibited) son inhibidos contra la corrosión y la herrumbre.

Anexo VI
Guía Práctica para estimar Criticidades

El objetivo de esta guía es definir los criterios para establecer niveles de Criticidad en **Unidades Funcionales** como equipos, conjunto de equipos, sistemas o procesos productivos completos. El **Grado de Criticidad** (GC) se usa para medir, de forma relativa, el impacto en el negocio que produce la detención por averías.

El primer paso es listar las Unidades Funcionales que se priorizarán y que formarán parte del proceso. Para cada una, se cuantifican **factores** según se detalla a continuación. Finalmente, se vuelca la puntuación en la matriz de criticidad y, la suma de la productoria **Peso** (P) por **Impacto** (I) de cada factor, resultará en el Grado de Criticidad. Se definen, como ejemplo, las siguientes tres categorías para el GC.

Clase A: GC ≥ 160
Clase B: GC de 100 a 159
Clase C: GC ≤ 99

1. Seguridad y Medio Ambiente

Evaluar si al producirse una avería, se generan consecuencias que pueden afectar la integridad física de personas y/o perjudicar al medio ambiente.

- Peso Relativo: 10
- Impacto: Si hay Riesgo = 10; Si no hay Riesgo = 0

2. Producción

Determinar si la avería de la unidad funcional provoca una disminución de la capacidad productiva. La unidad funcional se considera individualmente; no asumiendo la existencia de otras unidades redundantes (stand-by).

- Peso Relativo: 7
- Impacto: ALTO = 10; MEDIO = 5; BAJO = 0

3. Calidad

Analizar el proceso de falla completo y evaluar si puede verse perjudicada la calidad del producto terminado o de un producto intermedio (subproducto).

- Peso Relativo: 7
- Impacto: ALTO = 10; MEDIO = 5; BAJO = 0

4. Pérdidas / Daños

Ciertas averías provocan daños o pérdidas en el sistema que ocasionan gastos extraordinarios aunque no afectan la producción ni la calidad.

- Peso Relativo: 5
- Impacto: ALTO = 10; MEDIO = 5; BAJO = 0

5. Equipos Redundantes (Stand-by)

Un equipo redundante (Stand-by) es aquel que se encuentra instalado y fuera de servicio, pero presto a funcionar si se ve afectada la unidad funcional protegida. El proceso de conmutación puede ser automático o bien a través de simples y rápidas maniobras, sin causar perjuicio en la seguridad o capacidad productiva

- Peso Relativo: 4
- Impacto: Si existe = 0; Si no existe = 10

6. Régimen de Marcha

El concepto de continuidad se relaciona con el ciclo de trabajo de la unidad funcional analizada. Si la misma funciona por un tiempo mayor al 75% de la duración del proceso al cual pertenece, se considerará "continuo".

- Peso Relativo: 3
- Impacto: Si es continuo = 10; Si no es continuo = 0

7. Frecuencia de Fallas

Es preciso estimar la frecuencia de las detenciones (debidas a cualquier avería) de la unidad, durante su régimen de trabajo normal.

- Peso Relativo: 3
- Impacto: ALTO = 10 (> 6 fallas/año); MEDIO = 5 (> 2 fallas/año); BAJO = 0 (< 2 fallas/año)

8. Equipos de Reserva

Verificar si las partes más importantes de la unidad funcional (motor, bomba, ventilador, válvulas, etc.) se encuentran disponibles en el Almacén de Repuestos para ser sustituidas en caso que la unidad funcional quede fuera de servicio; y sin que esto perjudique la capacidad productiva o la calidad del producto.

- Peso Relativo: 2
- Impacto: Si existe = 0; Si no existe = 10

9. Tiempo Medio de Reparación (MTTR)

Debe estimarse el tiempo aproximado en reparar la unidad dañada, considerando las fallas más frecuentes que pueda sufrir.

- Peso Relativo: 2
- Impacto: 1 (< 2 hora); 4 (2 - 4 horas); 7 (4 - 8 horas), 10 (> 8 horas)

MATRIZ DE CRITICIDAD						
Factor	**Peso**	**Impacto**				P x I
1. Seguridad y Medio Ambiente	10	Si hay Riesgo = 10		Si no hay Riesgo = 0		
2. Producción	7	Alto = 10	Medio = 5	Bajo = 0		
3. Calidad	7	Alto = 10	Medio = 5	Bajo = 0		
4. Pérdidas / Daños	5	Alto = 10	Medio = 5	Bajo = 0		
5. Equipos Redundantes (Stand-by)	4	Si existe = 0		Si no existe = 10		
6. Régimen de Marcha	3	Continuo = 10		No Continuo = 0		
7. Frecuencia de Fallas	3	< 6 fallas/año = 10	< 2 fallas/año = 5	> 2 fallas/año = 0		
8. Equipos de Reserva	2	Si existe = 0		Si no existe = 10		
9. Tiempo Medio de Reparación (MTTR)	2	> 2 horas = 1	2 a 4 horas = 4	4 a 8 horas = 7	< 8 horas = 10	
CRITICIDAD = Sumatoria (Peso x Impacto)					Σ	
Mayor o igual a 160 = A						
De 100 a 159 = B						
Hasta 99 = C						

Tabla I Anexo VI.

Nota: Los valores propuestos en la matriz de criticidad para cuantificar tanto el **Peso** de cada factor como el **Impacto**, son orientativos. Cada industria debe adaptarlos al tipo de unidad funcional, proceso, equipo, sistema o subsistema. De la misma forma, el rango de valores escogido para definir la categoría A, B ó C pueden variar sensiblemente.

Por su parte, el Mantenimiento Imperativo o Legal (Capítulo 1) puede obligar que una unidad funcional adquiera la categoría A aunque su puntuación en la matriz no alcance valores superiores a 160.

Anexo VII
Planilla tipo para Análisis de Fallas (ADF's)

Compañía	Análisis de Falla (ADF)	Código	
		Revisión:	
Área ó Sector		Fecha:	

ADF N°: | Máquina / Subsistema:

PRODUCCION - OPERACION

¿Qué sucedió?

Parte del Equipo:

Problema:

¿Cómo se detectó el problema?

☐ Ruido ☐ Juego / Desgaste ☐ Alarmas
☐ Vibración ☐ Pérdidas / Fugas ☐ Suciedad
☐ Temperatura ☐ Corrosión ☐ Fricción
☐ Otros:

Modo: ☐ Accidental ☐ Repetitivo

¿Cuánto duró?

	FECHA:	HORA:
Inicio del Problema		
Puesta en Marcha		
Tiempo de Reparación (min.)		

¿Quiénes Intervinieron?

Detectores:	Reparadores:
Mencionar las personas que descubrieron el problema.	Mencionar las personas que solucionaron el problema.

REPARADORES INMEDIATOS

Documentación de la Falla (Esquema ó Dibujo)	¿Qué puntos se examinaron?	Resultado de lo examinado	¿Qué acciones se tomaron?
Incluir algún dibujo o fotografía de la falla o de la zona circundante, si existe.	Describir los puntos que pueden tener alguna relación con el problema o falla, y que se detectaron antes o después de producida la misma.	Explicar brevemente lo que se encontró al examinar la zona luego de sucedido el problema.	Explicar brevemente las acciones que se tomaron para reponer la funcionalidad del sistema.

¿Ocurrió en otras oportunidades? Si/No | ¿Con qué frecuencia ocurre?

MANTENIMIENTO

¿Quiénes intervendrán en el Análisis? | ¿Cuándo se analizará?

Descripción del Fenómeno : 5W + 1H

¿Qué?
¿Cuándo?
¿Dónde?
¿Quién?
¿Cuál?
¿Cómo?

Resumen del FENÓMENO

En función de las respuestas obtenidas con el método de las 5W + 1H, hacer un resumen del fenómeno ocurrido.

BÚSQUEDA DE LAS CAUSAS RAÍZ (Ronda de Por qués)

PARTES DE LA MAQUINA y ASPECTO HUMANO

1° ¿POR QUÉ ?	2° ¿POR QUÉ ?	3° ¿POR QUÉ ?	4° ¿POR QUÉ ?	5° ¿POR QUÉ ?	Causas Raíz

ACCIONES PARA QUE NO VUELVA A OCURRIR

¿Cómo ?	¿Cuál? Nombre	¿Cuál? Código (si aplica)	Responsable	Fecha prevista de cumplimiento	Fecha real de cumplimiento
Acciones inmediatas					
Mejoras al diseño					
Nuevos instructivos, OPL's, actividades o planes de capacitación.					
Otros sistemas donde es posible replicar el aprendizaje.					
Inversiones / Proyectos necesarios					
Otras acciones necesarias					

Cierre del ADF
(Fecha y Firma de los Responsables)

Tabla I Anexo VII. Planilla tipo para Análisis de Fallas (ADF's).

Anexo VIII
Ejemplo de OPL (One Point Lesson)

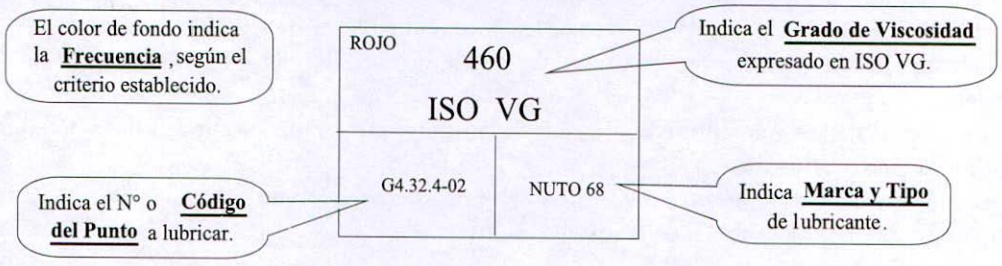
OPL : LECCIÓN DE UN PUNTO

Código OPL: 002-025 LX-S MM-LUBRICACIÓN-ER	Especialidad: Mecánica - Operación	Fecha : 08/19/2007 Revisión : 03
Objetivo de la OPL: Visualizar e identificar puntos de lubricación	TEMA: Puntos de Lubricación (Identificación)	Área: Conocimientos

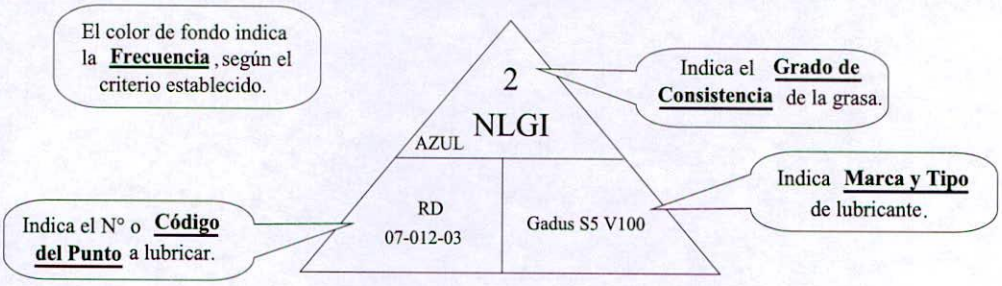
Criterio: Identificación de Frecuencias de lubricación por COLORES

COLOR	FRECUENCIA
ROJO	DIARIA
VERDE	SEMANAL
AMARILLO	QUINCENAL
AZUL	MENSUAL
MARRÓN	TRIMESTRAL
GRIS	SEMESTRAL

Criterio de Identificación de Aceites por COLORES



Criterio de Identificación de Grasas por COLORES



Preparó	Revisó	Aprobó
Apellido y Nombre	Apellido y Nombre	Apellido y Nombre
Fecha	Fecha	Fecha

Figura I Anexo VIII. Ejemplo de OPL (Identificación de Puntos de Lubricación).

Anexo IX
Análisis del Costo de Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Cost)

El Costo del Ciclo de Vida (LCC) debe calcularse en la fase de diseño. Cada diseño podrá diferir en su LCC según las variables que se describen más abajo. El LCC se obtiene como la suma de los Gastos de Adquisición (GA) y los Gastos de Operación (GO). Así, una Unidad Funcional tendrá un LCC dado por todos los costos que involucra su diseño, montaje, puesta en marcha, mantenimiento, operación, gestión administrativa y descarte. Es interesante analizar dónde están habitualmente concentrados los mayores costos de un equipo en toda su vida operativa.

Gasto de Adquisición (GA)

√ Costos de factibilidad y adquisición del bien.
√ Costos del proyecto de inversión (desarrollo, seguimiento y Gestión Temprana).
√ Costos de capacitación, entrenamiento e información (material didáctico, traslados, manuales, etc.).
√ Costos de almacenamiento, transporte, izaje, manejo y montaje.
√ Costos de certificación, si los hubiera.

Gastos de Operación (GO)

√ Costos directos de Operación (energía, mano de obra, herramientas y materiales de operación).
√ Costos indirectos de Operación (capacitación, entrenamiento, beneficios, etc.).
√ Costos directos de Mantenimiento (repuestos, mano de obra, servicios técnicos, diagnóstico de fallas, etc.).
√ Costos indirectos de Mantenimiento (capacitación, entrenamiento, gestión de información técnica, gestión administrativa, etc.).
√ Costos de inventario (repuestos, herramientas, materiales, subconjuntos y equipos stand-by).
√ Costos por la disposición final de la instalación (descarte).

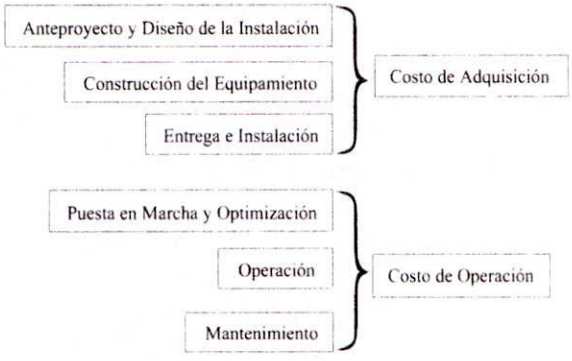


Figura 1 Anexo IX Resumen de apertura del Costo del Ciclo de Vida (LCC).

Anexo X
Análisis de Tiempos Productivos

Tiempo Total Calendario (T_{TC})
Es el tiempo total adoptado para el horizonte de análisis (por ejemplo 1 día = 1440 minutos, 1 año = 8760 horas, etc.). También son válidos los cálculos mensuales (1 mes = 720 horas).

Empresas con gran estacionalidad acostumbran a no utilizar como base de cálculo el tiempo total calendario. Por ejemplo, si durante 9 meses la fábrica trabaja a 2 turnos de 8 horas y los otros 3 meses en 3 turnos, entonces para los primeros 9 meses no incluyen en el tiempo de no uso el turno no productivo.

Tiempo de No Uso (T_{NU})
Tiempo durante el cual el sistema productivo no se utilizará para producir, ni se realizará ningún tipo de actividad como ser, limpieza, mantenimiento, ajustes, etc. El T_{NU} es el tiempo en que la unidad productiva esta completamente "abandonada" (sin personal de operación, mantenimiento o terceros).

Algunas empresas autorizan una mínima dotación de personal (1 ó 2 personas) para efectuar tareas de limpieza, inspección general de área o vigilancia. En rigor, debería considerarse el Tiempo de No Uso como aquel durante el cual la empresa no incurre en gastos operativos sobre la unidad productiva.

Tiempo de Uso (T_U)
Es la diferencia entre el Tiempo Total Calendario y el Tiempo de No Uso; es decir, cuando hay actividad en la unidad productiva.

Tiempo de Paradas Programadas (T_{PP})
Se incluye aquí el tiempo destinado a tareas preventivas de mantenimiento, limpieza de equipos, rutinas de inspección estáticas, descansos, refrigerios, reuniones programadas con los operarios de producción, reuniones de mejora continua, etc. También, deben incluirse los tiempos reales insumidos para efectuar cambios de formato, marca, moldes, calibre, etc.

Tiempo Total Paradas Programadas (T_{TPP})
La suma de los tiempos anteriores es el Tiempo Total de Paradas Programadas (T_{TPP}).

Tiempo Disponible para Operar (T_{DO})
Es el total de tiempo que se espera que el sistema opere, habiéndose descartado la 1° y 2° pérdida según TPM. Se obtiene restando al Tiempo Total Calendario (T_{TC}), el Tiempo Total de Paradas Programadas (T_{TPP}).

Tiempo Total de Paradas No Programadas (T_{TPNP})
Es el tiempo correspondiente a todas las paradas del equipo no planificadas (fallas y averías) que afectan directamente la producción de la máquina. Es común dividirlas en dos tipos.

Aquellas que son externas a la unidad productiva y que conforman el Tiempo por Paradas Externas (T_{PE}); y las producidas por causas inherentes al equipo cuya suma constituye el Tiempo por Paradas Internas (T_{PI}).

Tiempo de Operación (T_O)
El Tiempo de Operación se calcula como la diferencia entre el Tiempo Disponible para Operar (T_{DO}) y el Tiempo Total de Paradas No Programadas (T_{TPNP}) que cuantifica la 3° y 4° pérdida.

Tiempo por Menor Velocidad de Operación (T_{MVO})
Se considera como T_{MVO} al tiempo de menos que podría haber funcionado una máquina cuya capacidad productiva (velocidad de producción) es C_N, para fabricar la misma cantidad de producto que la máquina en estudio produjo en T_O.

Suelen incluirse también dentro de este tiempo las micro-detenciones (Ej.: < 3 minutos).

Tiempo Neto de Operación (T_{NO})
Surge de restarle al T_O, el Tiempo por Menor Velocidad de Operación (T_{MVO}).

Tiempo para Retrabajos (T_R)
Es el tiempo adicional que le insumiría a la unidad productiva elaborar la cantidad de producto defectuoso fabricado durante el Tiempo Neto de Operación. Representa la 5° y 6° pérdida.

Tiempo Efectivo de Producción (T_{EP})
La diferencia entre los dos tiempos anteriores es el Tiempo Efectivo de Producción.

Si la unidad productiva fuese capaz de fabricar todos los productos en condiciones de calidad, el Tiempo Efectivo de Producción (T_{EP}) sería equivalente al Tiempo Neto de Operación (T_{NO}) y no existirían pérdidas por retrabajos.

Ejemplo 1
Supóngase el caso de una línea de montaje que trabaja a dos turnos completos de 8 horas c/u durante los siete días de la semana. La demanda esta satisfecha, por lo que los dos turnos diarios de producción son suficientes.

Una vez por semana - los lunes - se hacen trabajos de mantenimiento y limpieza en la línea que obligan a detener toda la unidad productiva por un lapso de 8 horas (1 turno completo).

A lo largo de los dos turnos, y todos los días, se realizan tres cambios de producto que detienen la línea por 20 minutos cada vez.

Además, los días jueves - una semana de mañana y otra de tarde - el personal acude a la reunión de productividad cuyo tiempo estipulado es de una hora. En el último mes hubo 5 de estas reuniones.

El registro de fallas del mes anterior arroja que hubo en total 264 minutos de parada por problemas en la línea. La producción total fue de 7680 unidades y los registros de calidad identificaron que 20 de ellas se encontraban fuera de especificación, lo que obligó a reprocesar muchas de sus partes.

Siendo la velocidad nominal de la línea 0,35 unidades por minuto, determinar la Eficacia Global de Equipo (EGE) y la Productividad Total de Equipo (PTE) correspondientes al último mes de producción.

Opción 1
El tiempo total calendario (T_{TC}) es referido a un mes completo y equivale a 720 horas (24 horas x 30 días).

De acuerdo al régimen de producción, el tiempo de no uso es sencillamente:

T_{NU} = 8 horas x 30 días = 240 horas

El tiempo de paradas programadas, es la suma del tiempo destinado a Mantenimiento, el tiempo utilizado para cambios de producto y el tiempo para acudir a la reunión semanal de productividad; esto es:

T_{PP} = 8 horas x 4 veces + (20 minutos x 3 veces x 30 días) + 1 hora x 5 veces

T_{PP} = 32 horas + 30 horas + 5 horas = 67 horas

Se considera que en el mes hubo 4 detenciones programadas para Mantenimiento.

La ecuación 7.4.8 nos brinda el tiempo disponible para operar.

$T_{DO} = T_{TC} - (T_{NU} + T_{PP})$ = 720 horas - (240 horas + 67 horas) = 413 horas

El Grado de Utilización (G_U) queda definido por la ecuación 7.4.7 de la siguiente manera:

$GU = T_{DO} / T_{TC}$ = 413 horas / 720 horas = 0,5736

GU = 57,36%

Disponibilidad
Siendo el tiempo total por paradas no programas de 264 minutos y teniendo en cuenta la ecuación 7.4.1, resulta que la Disponibilidad es:

$$D_O = (T_{DO} - T_{TPNP}) / T_{DO} = (24780 \text{ minutos} - 264 \text{ minutos}) / 24780 \text{ minutos} = 0{,}98934$$

$$\mathbf{D_O = 98{,}93\%}$$

Rendimiento
El tiempo de operación para todo el mes fue de 24516 minutos (24780 - 264).
La producción mensual fue de 7680 unidades; por lo que C_{PO} = 7680 unidades.

Para calcular el rendimiento utilizamos la ecuación 7.4.2.

$$R = CP_O / (T_O \cdot C_N) = 7680 \text{ unidades} / (24516 \text{ minutos} \times 0{,}35 \text{ unidades/minuto}) = 0{,}8950$$

$$\mathbf{R = 89{,}5\%}$$

Índice de Calidad
Utilizando la ecuación 7.4.5 se tiene:

$$I_C = Vp_{\text{ACEPTADO}} / (V_{p\,\text{ACEPTADO}} + V_{p\,\text{RECHAZADO}}) = (7680 - 20) / 7680 = 0{,}99739$$

$$\mathbf{I_C = 99{,}74\%}$$

Obsérvese que la velocidad neta de operación de la línea es 0,3133 unidades / minuto.

Con los valores anteriores puede calcularse la Eficacia Global de Equipo según:

$$EGE = D_O \cdot R \cdot I_C = 0{,}98934 \times 0{,}8950 \times 0{,}99739 = 0{,}88315$$

$$\mathbf{EGE = 88{,}32\%}$$

y la Productividad Total de Equipo (PTE) según 7.4.9 es:

$$PTE = GU \cdot EG = 0{,}5736 \times 0{,}88314 = 0{,}5066$$

$$\mathbf{PTE = 50{,}66\%}$$

Opción 2
Esta opción no considera el tiempo de no uso, por lo que el tiempo total calendario (T_{TC}) referido al mes completo es igual a 480 horas (16 horas x 30 días).

El tiempo de paradas programadas es el mismo que en la opción anterior.

$$T_{PP} = 8 \text{ horas} \times 4 \text{ veces} + (20 \text{ minutos} \times 3 \text{ veces} \times 30 \text{ días}) + 1 \text{ hora} \times 5 \text{ veces}$$

$$T_{PP} = 32 \text{ horas} + 30 \text{ horas} + 5 \text{ horas} = 67 \text{ horas}$$

El tiempo disponible para operar es:

$T_{DO} = T_{TC} - (T_{NU} + T_{PP})$ = 480 horas - (0 hora + 67 horas) = 413 horas

y el Grado de Utilización (GU) queda definido por la ecuación 7.4.7 de la siguiente manera:

$GU = T_{DO} / T_{TC}$ = 413 horas / 480 horas = 0,8604

GU = 86,04%

La Eficacia Global de Equipo (EGE) resulta ser la misma.

EGE = 88,32%

Ahora la Productividad Total de Equipo (PTE) según 7.4.9 es:

PTE = GU . EGE = 0,86041 x 0,88320 = 0,7599

PTE = 75,99%

Opción 3
Una alternativa que encuentran útil algunas empresas, es tener en cuenta la Eficiencia Global de Equipo (OEE - Overall Equipment Effectiveness) como indicador de rendimiento. Bajo estas circunstancias y para cuantificar el impacto ocasionado por las paradas programadas, se parte del tiempo de uso (T_U).

Disponibilidad
Siendo el tiempo de uso igual a:

T_U = 16 horas x 30 días = 480 horas

La Disponibilidad Operacional, para esta opción, resulta de la ecuación 7.4.12.

$D'_O = (T_U - T_{PP} - T_{TPNP}) / T_U = T_O / T_U$

D'_O = (480 horas - 67 horas - 264 minutos) / 480 horas = (28800 - 4020 - 264) / 28800

D'_O = 0,85125

D'_O = 85,12%

Dado que los otros factores son iguales (Rendimiento e Índice de Calidad), la eficiencia global de equipo (OEE) resulta (ecuación 7.4.13):

$OEE = D'_O . R . I_C$ = 0,85125 x 0,8950 x 0,99739 = 0,75992

OEE = 75,99%

Obsérvese que el valor de Productividad Total de Equipo (PTE) de la opción 2, es igual al de Eficiencia Global de Equipo (OEE); como es de esperar desde el punto de vista matemático.

Ejemplo 2

Supóngase que en la Opción 1 del ejemplo anterior, el total de piezas fabricadas puede ser absorbido por el mercado, y que cada una tiene un costo de producción para la empresa de $450. El beneficio neto que obtiene la compañía por la venta de cada pieza es de $55. Si la velocidad nominal de la línea es de 0,35 piezas por minuto, se dejan de fabricar (por indisponibilidad) un total aproximado de 92 piezas (264 min. x 0,35 piezas/min.).

Por bajo rendimiento, se produjeron aproximadamente 901 piezas menos de lo esperado (24516 min. x 0,35 piezas/min. - 7680 piezas). Siendo, además, que las piezas rechazadas deben descartarse, se tiene que la pérdida total de esta línea de montaje es:

Pérdida = 92 x $55 + 901 x $55 + 20 x $450 = **$63.615**

Recordar que la línea tiene un valor de EGE del **88,32%**

Supóngase ahora que, bajo las mismas condiciones, una línea idéntica tuvo un T_{TPNP} de 124 minutos (99,5% de disponibilidad). Por falta de disponibilidad, entonces, se dejaron de fabricar aproximadamente 43 piezas.

Si la línea en el mes fabricó 7920 piezas, su rendimiento asciende al 91,78% (7920 unidades / ((24780 - 124) minutos x 0,35 unidades/minuto) y se dejaron de fabricar 710 unidades.

Si las unidades rechazadas fueron 88, el índice de calidad llegó al 98,89% ((7920 - 88) / 7920).

La pérdida de esta línea fue:

Pérdida = 43 x $55 + 710 x $55 + 88 x $450 = **$81.015**

Sin embargo, su EGE es:

EGE = 0,995 x 0,9178 x 0,9889 = **90,3%**

Obsérvese que, aún con una Eficacia Global de Equipo levemente superior, la segunda línea provoca una pérdida superior. Esto es a consecuencia de que un indicador global o integral como el EGE, asigna (por simple multiplicación) el mismo factor de peso a las tres variables (disponibilidad, rendimiento e índice de calidad).

Línea 1		Línea 2	
Disponibilidad	98,93%	Disponibilidad	99,50%
Rendimiento	89,50%	Rendimiento	91,78%
Calidad	99,74%	Calidad	98,89%
EGE	88,32%	EGE	90,30%
Pérdida	$ 63.615	Pérdida	$ 81.015

Tabla I Anexo X.

NOTA: Este último ejemplo está inspirado en uno de similares características propuesto en la página 306 del libro RCMII de John Moubray. Ver referencia bibliográfica.

Anexo XI
Estrategia de las 5S (Housekeeping)

La técnica de las 5S es una herramienta para optimizar los lugares (puestos) de trabajo. La letra "S" se refiere a cinco palabras de origen japonés que significan respectivamente:

Seiri (Clasificación / Organización)
Seiton (Orden)
Seiso (Limpieza)
Seiketsu (Aseo)
Shitsuke (Disciplina)

SEIRI (Clasificación / Organización)
El primer paso sugerido por el método de las 5S, es la clasificación de las "cosas"; vale decir, eliminar del área de trabajo todos aquellos elementos (papeles, cajas, carpetas, repuestos, piezas, herramientas, etc.) innecesarios y que, con gran probabilidad, no serán utilizados en ninguna ocasión futura.

Conforme pasa el tiempo, los lugares de trabajo se van llenando y ocupando con elementos que no tienen ningún valor de uso pero que ocupan espacio (útil para otros elementos) e incrementan, entre otras cosas, el riesgo de accidentes o incidentes.

En esta etapa se separan (clasifican) los elementos necesarios de los innecesarios.

SEITON (Orden)
En este paso se ordenan y guardan las cosas realmente necesarias de acuerdo a algún criterio definido como, tamaño, peso, grado de uso, rotación, volumen, forma, seguridad, peligrosidad, etc.

Para situaciones muy especiales, puede ser necesario hacer un estudio de tiempos para definir la mejor forma de ordenar y ubicar los elementos en o cerca del puesto de trabajo.

Un área ordenada permite localizar los elementos de trabajo con más facilidad. Ayudan al orden los métodos de control visual como tarjetas, indicadores, fotos, carteles, instructivos gráficos, etc. Los recursos económicos destinados a ordenar los lugares de trabajo encuentran su beneficio o retorno en muy breve tiempo.

El orden y la limpieza hacen del área de trabajo un ámbito agradable y placentero. Además, aceleran los procesos internos evitando pérdidas de tiempo en localizar piezas y herramientas.

SEISO (Limpieza)
Consiste en limpiar con profundidad para identificar y eliminar las fuentes de contaminación. Eliminadas las fuentes (o causas), el mantenimiento de la limpieza se hace mucho más sencillo.

La *limpieza* es *inspección*. Téngase en cuenta que muchos síntomas de deterioro quedan ocultos bajo la acumulación de suciedad, polvo, grasa, tierra, etc.

Las rutinas de limpieza deben ser incorporadas como parte del trabajo diario, y pueden aplicarse tanto en ámbitos de oficina como en talleres de mantenimiento.

La finalidad del paso SEISO es encontrar un grado tal de optimización del sistema que sólo exista contaminación natural e inevitable, porque todas las fuentes de contaminación posibles fueron eliminadas.

Es por muchos mal entendido que la limpieza es una tarea de poca importancia; sin embargo, las personas más calificadas técnicamente encuentran en la limpieza la mejor forma de identificar problemas serios (modos de falla) en las máquinas.

SEIKETSU (Aseo)
Una vez efectuada la limpieza profunda, es necesario mantener el nivel de limpieza según el estándar establecido. Este paso requiere, en muchos casos, que los procesos de trabajo sean revisados e, incluso,

cambiados. El cambio o modificación de dichos procesos debe estar orientado a que todas las actividades que realiza el colaborador conserven la limpieza y la higiene de su lugar de trabajo. Lo importante es lograr la costumbre de mantener los lugares limpios y ordenados (cambio de filosofía).

Los estándares o "procesos limpios" deben ser elaborados por los mismos trabajadores que lo usarán, y controlados y apoyados por la jefatura o dirección de la empresa. Ellos los ajustarán a sus necesidades y, conforme transcurra el tiempo, los mejorarán y optimizarán.

SHITSUKE (Disciplina)
Por último, debe asegurarse el cumplimiento de todas las normas establecidas en el paso anterior. Para ello, la disciplina del colaborador juega un rol principal. Las personas deben comprometerse con su rutina de trabajo y con la de los demás, con seriedad y profesionalismo. Sólo un cumplimiento riguroso de todas las normas de la empresa, garantizará el estado de orden y limpieza general.

Anexo XII
Códigos de Equipos

La siguiente tabla muestra algunos ejemplos para la codificación de equipos productivos.

Código	Tipo de Equipo	Código	Tipo de Equipo
AG	Agitador	MH	Motor hidráulico
AA	Aire acondicionado	PC	Puente de cañerías
AU	Autoelevador a combustión	QM	Quemador
AE	Autoelevador eléctrico	TR	Reactor
BL	Balanza	IR	Red contra incendios
BA	Bateria	GR	Red de agua industrial
BE	Bomba a engranajes	LR	Red de agua proceso
BT	Bomba a tornillo	BR	Red de agua potable
BC	Bomba centrifuga	AR	Red de aire comprimido
BV	Bomba de vacío	GR	Red de gas
BN	Bomba neumática	OR	Red de vacío
BS	Bomba sumergible	VR	Red de vapor
CP	Caldera de vapor	ER	Red eléctrica general
CH	Central hidráulica	RE	Reductor
CT	Compresor a tornillo	SA	Secador de aire
CC	Compresor centrifugo	SP	Sensor de presión
CR	Compresor rotativo	ST	Sensor de temperatura
TC	Contenedor	SV	Sensor de velocidad
EL	Elevador	SE	Separador
EV	Envasadora	SI	Sistema de Instrumentación
HG	Horno de gas	TE	Tablero eléctrico
HE	Horno eléctrico	TT	Tanque almacenamiento de producto
IC	Intercambiador de calor	TP	Tanque elaboración de productos
IN	Inyectora	TF	Torre de enfriamiento
ML	Molino de bolas	TG	Turbina de gas
MP	Molino de perlas	TV	Turbina de vapor
ME	Motor eléctrico	VC	Ventilador centrifugo

Tabla I Anexo XII.

Bibliografía

1-Gestión integral de mantenimiento. Luis Navarro Elola, Ana Clara Pastor Tejedor, Jaime Miguel Mugaburu Lacabrera. Marcombo - Boixareu Editores. ISBN 84-267-1121-9.

2-Ingeniería de Mantenimiento. Eduardo Manuel Cruz Rabelo. Editorial Nueva Librería. ISBN: 950-9088-88-9.

3-Organización y Gestión Integral de Mantenimiento. Santiago García Garrido. Ed. Díaz de Santos. 2003. ISBN: 84-7978-548-9.

4-La Empresa Integrada. Gustavo D. Santini. New Press Grupo Impresor S.A. Registro de Propiedad Intelectual N° 88220.

5-Administración Moderna de Mantenimiento. Lourival Augusto Tavares. Año 2000. Descarga de página www.mantenimientomundial.com

6-Estadística I y Probabilidad. Javier Martín-Pliego López y Luis Ruiz-Maya Pérez. Editorial AC. (2004). ISBN 84-9732335-1.

7-RCMII Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. John Moubray, Aladon LLC. Edición en Español 2004. ISBN 09539603-2-3.

8-Risk Based Management, A Reliability - Centered Approach. Richard B. Jones, 1995.

9-Métodos de Evaluación de Riesgos Laborales. Juan Carlos Rubio Romero, Díaz de Santos (2004). ISBN: 84-7978-633-7.

10-Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales. Juan Carlos Rubio Romero, Díaz de Santos (2002). ISBN: 84-7978-525-X.

11-Probabilidad y estadística. Serie Schaum, McGraw-Hill (2003). ISBN: 0-07-135004-7.

12-Mantenimiento Industrial. Enrique Dounce Villanueva, Compañía editorial continental. 2006. ISBN: 970-24-0914-4.

13-Introducción al Proyecto de Ingeniería. Enrique Villamil García - Miguel J. García Hernández. Preprinter, Editor s.e. Buenos Aires (2003). www.fi.uba.ar/6612/archives

14-Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales. Fred E. Meyers, Matthew P. Stephens. Pearson. ISBN: 970-26-0749-3.

15-La Meta. Eliyahu M. Goldratt. Díaz de Santos S.A.1993 ISBN: 84-7978-095-9.

16-No es cuestión de Suerte. Eliyahu M. Goldratt. Díaz de Santos S.A. 1995. ISBN: 84-7978-200-5.

17-El Síndrome del Pajar. Eliyahu M. Goldratt. Díaz de Santos S.A. ISBN: 84-7978-129-7.

18-Necesario pero no Suficiente. Eliyahu M. Goldratt, Díaz de Santos S.A. (2001). ISBN: 84-7978-487-3.

19-Mantenimiento: Fuente de beneficios. Jean Paul Souris, Díaz de Santos (1992). ISBN 84-7978-021-5.

20-Calor y Principios de la Termodinámica. F. I. Greco, Editorial Nueva Librería. Segunda Edición 1981.

21-Radiación Infrarroja y Ultravioleta, Tecnología y Aplicaciones. Ángel Valea Pérez - Jesús M.a Alonso Girón, McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U. ISBN: 84-481-2041-8.

22-Nuevas Técnicas de gestión de Stocks: MRP y JIT. Ramón Companys Pascual - Loan B. Fonollosa i Guardiet. Boixareu Editores. ISBN: 970-15-0435-6.

23-Elementos de medición y análisis de vibraciones. Evelio Palomino Marín, Cuba 1997. ISBN: 999905-46-29-0.

24-Sistemas de Optimización de Stocks. Miguel Miranda, Editorial EDUCA. ISBN: 950-523-021-4.

25-Mantenimiento Industrial. Organización, Gestión y Control. Raimundo Heber Gonzalez, Ed. Alsina. ISBN: 950-553-011-0.

26-Introducción a la Neumática. Antonio Guillén Salvador. Alfaomega. ISBN: 970-15-0479-8.

27-Investigación de Operaciones. Hamdy A. Taha, 5° Edición, Editorial Alfaomega. ISBN: 970-150115-2.

28-OREDA - Offshore Reliability Data Handbook. 4th Edition. Prepared by SINTEF Industrial Management, Distributed by Det Norske Veritas (DNV). ISBN 82-14-02705-5.

29-Safety, Reliability and Risk Management: An Integrated approach. Butterworth-Heinemann, Oxford. Sue Cox and Robin Tait (1998). ISBN: 0-7506-4016-2.

30-Reliability and Risk Assessment. Andrews J.D. and Moss T.R. (2002). 2° Edition. Professional Engineering Publishing Limited, London and Burty St. Edmunds, UK. ISBN: 1-86058-290-7.

31-Metrología para no-metrólogos. Rocío M. Marbán y Julio A. Pellicer A. 2002. SIM y OEA. ISBN: 99922-770-0-9.
32-Fault Tree Analysis. P. L. Clemens, 4° Edición, Jacobs Sverdrup, 2002.
33-Poka-Yoke. Mejorando la calidad de producto y evitando los defectos. Nikkan Kogyo Shimbun Ltd. y Factory magazine (Ed.). ISBN: 84-87022-73-1.
34-TPM en Industrias de Proceso. Takutaro Suzuki y otros autores. TGP Hoshin. ISBN: 84-87022189.
35-TPM. Programa de Desarrollo. Seiichi Nakajima (1991). ISBN: 84-87022-82-0.
36-Aceites y Lubricantes Industriales. Su tecnología y aplicación. YPF Lubricantes y Derivados. New Press Grupo Impresor S.A. 2000.
37-Rudnick, L.R. Lubricant Additives: Chemistry and Applications. Marcel Dekker. New York 2003. ISNB: 0-8247-0857-1.
38-Termodinámica Básica y Aplicada. I. Martínez. Madrid, Ed. Dosset, 1992. ISBN: 84-237-0810-1.
39-Mantenimiento. Su implementación y Gestión. Leandro Daniel Torres. Universitas 2° edición 2005. ISBN: 987-9406-81-8.
40-Técnicas para el Mantenimiento y Diagnóstico de Máquinas Eléctricas Rotativas. Fernández M., García M., Orcajo Cano J., Solares J. Marcombo. ISBN 84 267 1166-9.
41-Fundamentos de Metrología Industrial. Alvaro Medeiros de Farias Theisen. Porto Alegre, 1997.
42-Industrial Accident Prevention. 5th Edición. McGraw - 1980.
43-P-M Analysis. An Advanced Step in TPM Implementation. Kunio Shirose, Yoshifumi Kimura, Mitsugu Kaneda. Productivity Press - Portland, Oregon. ISBN: 1-56327-035-8.
44-Industrial accident prevention: a scientific approach. Heinrich HW. New York and London: McGraw-Hill, 1941.
45-Planeación Corporativa: Teoría y Práctica. David E. Hussey, Eimsford, N. J. Pergamon Press, Inc., 1974.
46-Guidelines for Process Hazrds Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis. Nigel Hyatt. Dyadem. ISBN: 0849319099.
47-Sistemas Instrumentados de Seguridad. Evolución, diseño y aplicación. Ing. Roberto E. Varela. Soluciones en Control. ISBN: 987-20960-0-7.
48-Ingeniería Económica de DeGarmo. William G. Sullivan, Elin M. Wicks y James T. Luxhoj. Pearson. ISBN: 970-26-0529-6.

Artículos, normas y otras publicaciones

1.Seminario de Mantenimiento Proactivo y Análisis de Aceites, presentación Ing. E. Lantos, Módulo I y II. Noria - Laboratorio Dr. Lantos, Edición 2003 Buenos Aires.
2.FAG - Lubricación de Rodamientos. FAG Sales Europe Iberia - España. Publicación N° WL 81 115/4 SB/98.2/06/03, TECFA® GROUP.
3.Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEE Transactions on Industry Applications. Schoen R, Habetler T, Kamran F and Bartheld R. Vol. 31. N° 6. November/December 1995.
4.Norma SAE JA1011 "Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes" (1999).
5.Norma SAE JA1012 "A Guide to Reliability-Centered Maintenance (RCM)" (2002).
6.Norma MIL-STD 2173 (AS) Reliability - Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment, 1986.

Referencias Web

1-La Evaluación no Destructiva de Materiales Estructurales y Puentes. Francisco J. Carrión Viramontes, María Guadalupe Lomelí Gonzáles, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Miguel Martínez Madrid. Publicación Técnica 231 Sanfandila 2003, Cuidad de México. www.imt.mx. Visita: 11-02-2008.

2-Tesis de Master. "Mejora en la confiabilidad operacional de las Plantas de generación de energía eléctrica: desarrollo de una metodología de gestión de mantenimiento basado en el riesgo (RBM)". Javier García González Quijano, Iberdrola 2004. www.iit.upcomillas.es/publicaciones/tesis. Visita: 22-01-2007.

3-Árbol de Fallos y Errores. Tomás Piqué Ardanuy - Antonio Cejalvo Lapeña, 1994. www.siafa.com.ar. Visita: 17-02-2007.

4-Árbol de Sucesos. Manuel Bestratén Belloví. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo. www.estrucplan.com.ar. Visita: 17-02-2007.

5-www.ingeman.net. Visita: 24-04-2007.

6-Laboratorio de Vibraciones Mecánicas. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Chile. www.dim.udec.cl/lvm Referencias: Pedro Saavedra G. y Edgar Estupiñan P. Visita: 25-09-2007.

7-www.mecanica.uniandes.edu.co. Visita 25-09-2007.

8-A-MAQ S.A. Análisis de Maquinarias. www.a-maq.com. Visita: 20-08-2007.

9-Uso intensivo de la fase y la órbita en el diagnóstico de turbogeneradores. Evelio Palomino Marín, Centro de Estudios, Innovación y Mantenimiento. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana - Cuba. www.tecem.com.br/site. Visita: 02-09-2007.

10-Diagnóstico de Fallas en motores de inducción mediante una estrategia de estimación de posición. Guillermo R. Bossio, Cristian H. De Angelo, Jorge A. Solsona, Guillermo O. García. Universidad Nacional de Río Cuarto y Universidad Nacional del Comahue. www.revista-riai.org. Visita: 03/10/2007.

11-Transformada de Hilbert. Alfredo Muñoz Ramos, Guillermo Jiménez Estévez, Universidad de Chile. www.u-cursos.cl/ingenieria. Visita: 03/10/2007.

12-Detección de problemas eléctricos en motores de C.A. y C.D. por medio del análisis de vibraciones. Ponencia del Ing. Oscar Jiménez Yenny, Reliability World Latín América 2005 Conferencia y Exhibición. www.noria.com/sp/rw2005.asp. Visita: 01/10/2007.

13-Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos. Ing. Juan C. Hidalgo, Grupo TERMOGRAM. www.termogram.com/articulos. Visita: 04/10/2007.

14-"Evaluación de la Severidad Vibratoria". Laboratorio de Vibraciones Mecánicas. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Chile. www.dim.udec.cl/lvm Visita: 01-09-2007.

15-Pruebas No Destructivas - Ultrasonido. Ing. Iván Escalona (UPII - IP) www.upiicsa.ipn.mx. Visita 08/09/2008.

16-UE Systems Inc. www.uesystems.com. Visita: 04/02/2008.

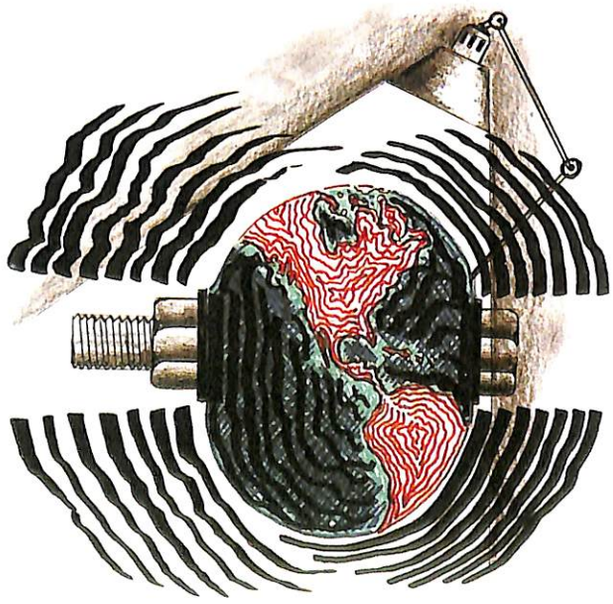
17-1° Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento, Octubre 2003. "La importancia de la correlación de las tecnologías predictivas en el diagnóstico de motores eléctricos", por Juan Carlos Hidalgo. www.cmcm.com.mx. Visita 04/10/2007.

USM. BIBLIOTECA CENTRAL
3560900239289

Hace poco más de quince años asistí, casi por casualidad, a un seminario dictado en la provincia de Jujuy relacionado con la Gestión de Activos. Recuerdo que era un día muy caluroso de verano y mis expectativas no eran del todo buenas. Sin embargo, jamás habría pensado que el contenido de la propuesta despertaría en mí tanto interés por el Mantenimiento Industrial.

A partir de aquel momento hubo un quiebre en mi carrera profesional y descubrí un mundo nuevo dentro de la Ingeniería que me atrapó profundamente. Todos estos años de estudio e investigación relacionados con la gestión de fallos, han derivado en este trabajo cuyo objetivo central es transformarse en una herramienta de consulta sobre los problemas habituales con que se enfrenta el Ingeniero de Mantenimiento.

La figura del Ingeniero de Mantenimiento naturalmente obliga a pensar en las funciones de una especialidad en constante crecimiento: la Ingeniería de Mantenimiento. Los profesionales dedicados a esta rama de la tecnología, son cada vez más reconocidos y deben ocupar un rol protagónico en la industria a través de la actualización y formación permanentes. El grado de formación que requiere un profesional de esta especialidad excede ampliamente las expectativas del pasado, cuando sólo era suficiente con ser un buen reparador de máquinas. En la actualidad, los Ingenieros de Mantenimiento deben alcanzar la categoría de mantenedores. Éstos se dedican a "mantener" las funciones de los equipos dentro de un marco de conveniencia para el proceso productivo (negocio) del que forman parte; deben comprender la importancia de los factores productivos sobre la política de gestión de activos y no mirar a su profesión como una actividad aislada del resto. El mantenedor moderno, incluso, debe considerar el compromiso que tienen las organizaciones con la sociedad para que los procesos (de bienes o servicios) sean sustentables.



9"7898/0"584209